

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2018

Bc. Jan Hladík



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MONITOROVACÍ A OCHRANNÝ SYSTÉM BATERIÍ

BATTERY MONITORING AND PROTECTION SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Hladík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Knobloch, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Jan Hladík

ID: 164280

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Monitorovací a ochranný systém baterií

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Dle dříve navržených schémat navrhnete desky plošných spojů.
2. Navrhnete způsob řízení.
3. Vyrobté funkční vzorek nové BMS.
4. Zařízení oživte a proveďte ověření parametrů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ANDREA, Davide. Battery management systems for large lithium-ion battery packs. Boston: Artech House, 2010, xi, 290 p. ISBN 16-080-7104-9.

[2] PATOČKA, Miroslav. Vybrané statě z výkonové elektroniky - svazek II: Pulsní měniče bez transformátoru. Brno, 2005.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Jan Knobloch, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem zařízení pro ochranu a monitorování baterií (tzv. systém BMS). Na základě rešerše jsou stanoveny požadavky na tento systém a navržena jeho koncepce. Systém umožňuje nezávislé odpojení zátěže a nabíječky od baterie pomocí tranzistorů MOS-FET, měření napětí a pasivní balancování jednotlivých článků baterie. Pro zpracování měřených dat a řízení celého zařízení je použit mikroprocesor. Byla navržena schémata zapojení, obrazce plošných spojů a způsob řízení. Následně byl vyroben funkční vzorek zařízení, který byl oživen a otestován.

KLÍČOVÁ SLOVA

Li-ion, baterie, akumulátor, balancování, ochranný obvod, monitorovací obvod, BMS, ochrana proti zkratu

ABSTRACT

This work deals with design of battery management system. Requirements for battery management system and its conception is discussed in the first part of the work. System is able to disconnect load or charger from battery using MOS-FET transistors. It measures battery cell's voltages and is capable of passive balancing. Microcontroller is used for data processing and system control. Schematics, printed circuit board layout and control algorithm was designed. Prototype of the battery management system was then manufactured and tested.

KEYWORDS

Li-ion, battery, balancing, BMS, battery management system, short-circuit protection

HLADÍK, Jan. *Monitorovací a ochranný systém baterií*. Brno, 2018, 69 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce: Ing. Jan Knobloch, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Monitorovací a ochranný systém baterií“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Knoblochovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a konstruktivní kritiku této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Jaromíru Dvořákovi a firmě SiliXcon za poskytnutí zdrojů a cenných rad při tvorbě této práce.

Brno

.....

podpis autora

OBSAH

Seznam symbolů, veličin a zkratk	10
Úvod	11
1 Chemické zdroje elektrické energie	12
2 Lithiové články	13
2.1 Princip funkce	13
2.2 Mechanická konstrukce	14
2.3 Používané technologie lithiových článků	15
2.4 Parametry lithiových článků	17
2.4.1 Napětí	18
2.4.2 Kapacita	18
2.4.3 Proud	18
2.4.4 Počet cyklů	19
2.4.5 Teploty	19
2.5 Tvorba akumulátorových baterií	19
2.6 Nabíjení	20
2.7 Ochrany	21
2.7.1 Ochrany integrované v článku	21
2.7.2 Elektronické ochrany	22
2.8 Balancování	23
2.8.1 Pasivní balancování	24
2.8.2 Aktivní balancování	24
3 Systémy BMS dostupné na trhu	26
3.1 Freemans Freesafe FS-XT	26
3.2 Orion Jr.BMS	27
3.3 Energus Tiny BMS	27
4 Požadavky na navrhovaný systém	29
4.1 Požadované funkce	29
4.2 Elektrické parametry	30
4.3 Další požadavky	30
5 Koncepce systému	32
5.1 Měření napětí a balancér	32
5.2 Procesor	34

5.3	Polovodičový spínač	34
5.4	Analogové ochrany	35
5.5	Provozní režimy a napájení	35
6	Návrh schémat zapojení	36
6.1	Měření napětí a balancování	36
6.2	Napájecí zdroj	37
6.2.1	Hlavní napájecí zdroj	38
6.2.2	Pomocný napájecí zdroj	39
6.3	Polovodičový spínač	40
6.3.1	Spínání vybíjecího portu	40
6.3.2	Obvod přednabíjení kapacitní zátěže	42
6.3.3	Spínání nabíjecího portu	42
6.4	Měření proudu	43
6.5	Analogové ochrany	43
6.6	Obvod detekce připojení zátěže	45
6.7	Obvod detekce připojení nabíječky	45
7	Návrh desky plošných spojů	47
7.1	Balancér	47
7.2	Deska procesoru	47
7.3	Deska polovodičového spínače	48
8	Řízení BMS	50
8.1	Struktura SW a funkce jednotlivých bloků	50
8.1.1	yOS	51
8.1.2	BQ driver	51
8.1.3	Driver polovodičového spínače	51
8.1.4	Algoritmus BMS	52
8.1.5	Aplikace	52
8.2	Popis algoritmu BMS	52
9	Oživení a měření	57
9.1	Oživení napájecích zdrojů	57
9.2	Oživení a testování analogových ochran	58
9.3	Oživení balancéru	58
9.4	Oživení polovodičového spínače a měřicích obvodů	59
9.5	Testování zkratové ochrany	59
9.5.1	Zkrat spínaný tyristorem	60
9.5.2	Zkrat přímo na výstupu BMS	61

9.5.3	Zkrat na konci dlouhých vodičů	63
10	Závěr	65
	Literatura	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Konstrukce lithiového akumulátoru [2]	13
2.2	Princip funkce lithiového akumulátoru [3]	14
2.3	Druhy pouzder lithiových článků (zleva cylindrický, prizmatický a článek v měkkém obalu)	16
2.4	Nabíjení lithiového článku [11]	20
2.5	Schéma zapojení pasivního balancování [13]	25
2.6	Schéma zapojení aktivního balancování [13]	25
3.1	Freemans Freesafe FS-XT [15]	26
3.2	Ewert Energy Systems – Orion Jr. BMS [16]	27
3.3	Energus Power Solutions – Tiny BMS [17]	28
5.1	Blokové schéma navrženého systému	32
5.2	Princip zapojení více měřicích obvodů – „štosování“ [18]	33
6.1	Zapojení měřicích vstupů pro obvod BQ76PL536A	36
6.2	Zapojení hlavního napájecího zdroje	38
6.3	Zapojení pomocného napájecího zdroje	40
6.4	Zapojení polovodičového spínače	41
6.5	Zapojení obvodu přednabíjení kapacitní zátěže	42
6.6	Zapojení měření proudu	43
6.7	Zapojení analogových ochran	44
6.8	Zapojení ochrany nabíjecího portu	44
6.9	Zapojení obvodu detekce připojení zátěže	45
6.10	Zapojení obvodu detekce připojení nabíječky	46
7.1	Balancér – jeden modul	47
7.2	Balancér – celek sestavený ze tří modulů	48
7.3	Deska procesoru	48
7.4	Deska polovodičového spínače	49
8.1	Blokové schéma SW pro řízení systému BMS	50
8.2	Stavový diagram algoritmu BMS	53
9.1	Časový průběh reakce zkratové ochrany na simulovaný zkrat	58
9.2	Časový průběh reakce zkratové ochrany na simulovaný zkrat	60
9.3	Průběh vypnutí zkratu na výstupních svorkách BMS	61
9.4	Průběh vypnutí zkratu na výstupních svorkách BMS	62
9.5	Porovnání měření proudu čidlem LEM a BMS (zkrat přímo na výstupu)	63
9.6	Průběh vypnutí zkratu na konci dlouhých vodičů	64
9.7	Porovnání měření proudu čidlem LEM a BMS (zkrat na konci dlouhých vodičů)	64

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

BMS	Battery management system – ochranný a monitorovací systém baterie
MOS-FET	<i>Metal-oxide semiconductor – field-effected transistor</i> – Polem řízený tranzistor s izolovaným hradlem.
IGBT	<i>Insulated gate bipolar transistor</i> – polem řízený bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
LCO	<i>Lithium cobalt oxide</i> – LiCoO_2 , aktivní materiál kladné elektrody lithiových článků
LMO	<i>Lithium manganese oxide</i> – LiMn_2O_4 , aktivní materiál kladné elektrody lithiových článků
NMC	<i>Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide</i> – LiNiMnCoO_2 , aktivní materiál kladné elektrody lithiových článků
LFP	<i>Lithium iron phosphate</i> – LiFePO_4 , aktivní materiál kladné elektrody lithiových článků
NCA	<i>Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide</i> – LiNiCoAlO_2 , aktivní materiál kladné elektrody lithiových článků
LTO	<i>Lithium titanate</i> – $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, aktivní materiál záporné elektrody lithiových článků
SOC	<i>State of charge</i> – aktuální stav nabití článku či celé baterie
SOH	<i>State of health</i> – míra opotřebování článku či celé baterie
CC-CV	<i>Constant current, constant voltage</i> – metoda nabíjení lithiových článků. Nejprve se nabíjí konstantním proudem a po dosažení maximálního napětí se nabíjí tímto napětím až do úplného napětí článku.
PTC	<i>Positive temperature coeficient</i> – polovodičová součástka, která při určité teplotě prudce zvýší svůj odpor. Používá se jako integrovaná nadproudová ochrana lithiových článků
CID	<i>Circuit interrupt device</i> – ochranná součástka pro lithiové články. Při zvýšení tlaku uvnitř článku přeruší elektrický obvod.

ÚVOD

V současné době je velmi často zmiňovaným termínem elektromobilita, tedy doprava založená zcela na bázi elektropohonů a elektrické energie. Hlavní výhodou použití elektrické energie v dopravě je nulová produkce lokálních emisí. Díky vzrůstajícímu povědomí lidí o problémech ekologie a znečištění ovzduší je použití čistě elektrických pohonů v dopravě čím dál více žádáno, protože by mohlo uvedené problémy částečně vyřešit nebo alespoň přesunout jinde, kde je znečištění ovzduší vysoké.

Rozvoj elektromobility umožnily objevy a výzkumy v oblastech elektrotechniky, chemie a materiálového inženýrství. Rozvoj polovodičových výkonových spínacích prvků, zejména tranzistorů MOS-FET a IGBT, umožnil výrobu měničů pro elektrické pohony, které umožňují téměř bezztrátovou regulaci výkonu. Společně s vývojem výkonových polovodičových prvků postupoval i vývoj mikroprocesorové techniky, která umožnila implementaci pokročilých řídicích algoritmů pro elektrické motory i pohony jako celek. Na poli chemie a materiálového inženýrství je pro elektromobilitu naprosto zásadní pokrok v oblasti elektrických akumulátorů.

Pravděpodobně nejpokročilejším zdrojem elektrické energie pro elektromobilitu jsou v současné době akumulátory na bázi lithia. Od svého představení v roce 1991 firmou SONY [1] prodělaly tyto akumulátory intenzivní vývoj a stal se z nich druh akumulátorů s velmi vysokou hustotou uložené energie na jednotku hmoty. Čím dál lepší ekonomická dostupnost této technologie způsobuje její pronikání i do segmentu osobní dopravy. K požadavku na cenu a vysokou hustotu energie se přidává také požadavek na robustnost a bezpečnost celé technologie.

Jako každá jiná technologie, i lithiové články vyžadují určitý způsob zacházení, aby fungovaly bezpečně a spolehlivě. Články na bázi lithia jsou obzvláště citlivé na způsob nabíjení, vybíjení, a na teplotu. Příliš hluboké vybíjení způsobuje rapidní pokles životnosti. Stejně tak i přebíjení způsobuje zkracování životnosti, navíc hrozí jejich vzplanutí či exploze. Akumulátory bývají tedy vybavovány specializovanými elektronickými obvody, jejichž úkolem je stav akumulátorů monitorovat a těmito nebezpečným stavům předcházet. Tyto obvody se označují zkratkou BMS, která pochází z anglického *battery management system*, což je možné do češtiny volně přeložit jako *ochranný a monitorovací systém baterie*.

Cílem této práce je seznámení s technologií nabíjecích lithiových článků a návrh elektronických obvodů pro monitorování a ochranu baterií tvořených právě zmíněnými lithiovými články. Systém BMS je vyvíjen ve spolupráci s firmou silixcon pro použití v elektrických vozidlech.

1 CHEMICKÉ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Jako chemické zdroje elektrické energie jsou označovány ty zdroje, u kterých dochází k přeměně chemické energie na elektrickou přímo, prostřednictvím souboru elektrochemických reakcí. Chemické zdroje elektrické energie jsou někdy také označovány jako galvanické články. Každý takový článek se skládá z kladné a záporné elektrody a elektrolytu. Elektrolyt umožňuje pohyb iontů mezi elektrodami a tím vznik elektrického proudu v obvodu, který je k elektrodám galvanického článku připojen. Galvanické články lze dělit na dvě základní skupiny:

- Primární články
- Sekundární články – akumulátory

Primární články je možné použít jenom jednou. Sekundární články, nejčastěji označované jako akumulátory, je možné po jejich vybití znovu nabít a používat je opakovaně.

V průběhu času bylo vyvinuto mnoho typů sekundárních článků založených na různých kombinacích chemických prvků a jejich vzájemných reakcích. Nejrozšířenějšími druhy sekundárních článků jsou:

- *Pb* – olovené akumulátory
- *NiCd* – Nikl-kadmiové akumulátory
- *NiMH* – Nikl-metal-hydridové akumulátory
- *Li-ion* – Lithium-iontové akumulátory
- *Li-pol* – Lithium-polymerové akumulátory

Poslední dva typy jsou si velmi podobné z hlediska principu funkce i z hlediska uživatelských vlastností. Jejich určitou nectností je, že jsou citlivé na způsob zacházení – přesné hodnoty vybíjecích a nabíjecích napětí a na teplotu. Bývají proto vybavovány elektronickými obvody, které tyto parametry monitorují a v případě potřeby zasáhnou, aby nedošlo k problémům. Tato práce se zabývá návrhem elektronických obvodů právě pro lithiové baterie, proto budou tyto články v následujícím teoretickém úvodu popsány z hlediska principu funkce, konstrukce a uživatelských vlastností.

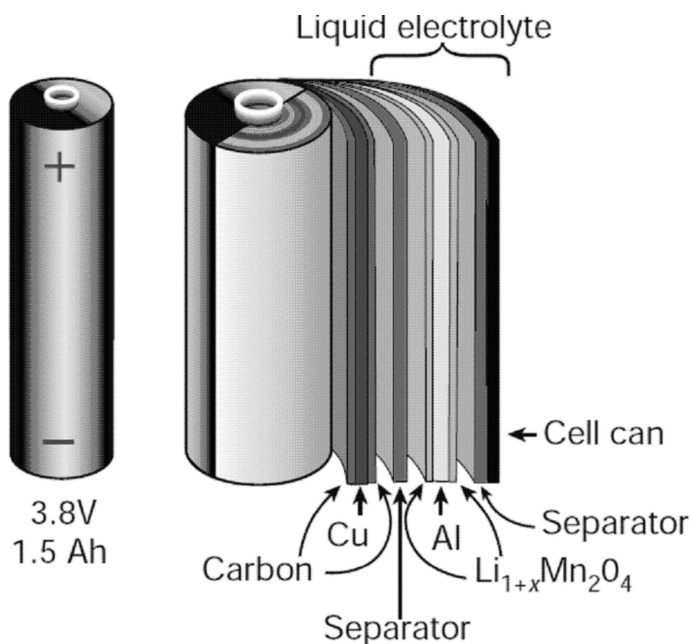
2 LITHIOVÉ ČLÁNKY

2.1 Princip funkce

Konstrukce lithiového článku je zobrazena na Obr. 2.1. Hlavními funkčními celky jsou kladná a záporná elektroda, separátor a elektrolyt. Elektrody mají nejčastěji tvar pásků, na jejichž povrchu je nanesena tenká vrstva aktivního materiálu. Jako základ záporné elektrody se nejčastěji používá měď, na které je nanesena vrstva grafitu. Základem kladné elektrody bývá hliník, na jehož povrchu je nanesena tenká vrstva sloučenin lithia s dalšími prvky. Druh sloučeniny do značné míry definuje chování článku a lithiové články bývají často rozdělovány právě podle druhu aktivního materiálu na kladné elektrodě.

Mezi elektrody je vložen separátor, který zabraňuje vzájemnému dotyku elektrod, ale zároveň umožňuje pohyb iontů elektrolytu mezi elektrodami. Separátor je nejčastěji tvořen plstěným nebo tkaným nylonem. Separátor je napuštěný tekutým elektrolytem, který obsahuje lithiové ionty, jejichž pohybem mezi elektrodami je vytvářen elektrický proud. V případě článků Li-pol není použit separátor a tekutý elektrolyt, ale pouze elektrolyt ve formě polymeru, který je v pevném skupenství, a plní tedy i funkci separátoru – odděluje od sebe kladnou a zápornou elektrodu.

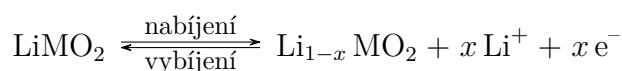
Elektrody, mezi které je vložen separátor s elektrolytem, jsou položeny na sebe, čímž je vytvořen elektrochemický článek. Takto vytvořený pás je potom svinut a vložen do válcového pouzdra či pouzdra přibližně pravoúhlého tvaru. [4]



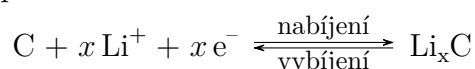
Obr. 2.1: Konstrukce lithiového akumulátoru [2]

Průběh nabíjecího a vybíjecího děje je znázorněn na Obr. 2.2. Během nabíjení článku se kladné ionty lithia uvolňují z kladné elektrody a jsou přitahovány k záporné elektrodě, do jejíž struktury jsou včleňovány. Zároveň jsou během nabíjení odebrány elektrony, které jsou nabíjecím zdrojem přesouvány do záporné elektrody, kde reagují s ionty lithia. Průběh vybíjecího děje lithiového článku je opačný. Oba děje jsou popsány následujícími chemickými rovnicemi:[5]

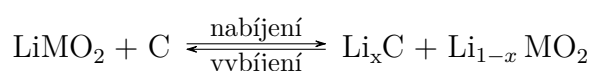
Kladná elektroda:



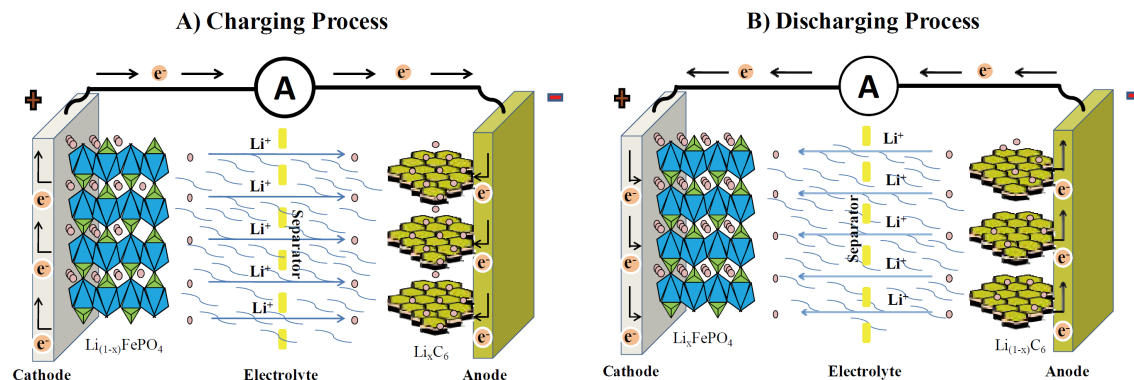
Záporná elektroda:



Souhrn:



Písmeno M v uvedených chemických rovnicích označuje kov použitý v aktivní vrstvě kladné elektrody. Nejčastěji používanými kovy jsou kobalt, nikl, mangan a železo, případně jejich různé kombinace. Jak již bylo zmíněno, použitý kov, do značné míry definuje vlastnosti článku. Nejpoužívanější sloučeniny jsou uvedeny v kapitole 2.3.



Obr. 2.2: Princip funkce lithiového akumulátoru [3]

2.2 Mechanická konstrukce

Lithiové články jsou vyráběny v mnoha velikostních a tvarových provedeních. Z tohoto hlediska je lze rozdělit do tří skupin:

- Cylindrické (válcové) články
- Prizmatické články
- Články v měkkém obalu

Cylindrické (válcové) články Elektrody ve formě fólií a separátor jsou položeny na sebe, svinuty do válce a vloženy do kovového pouzdra. Výhodou této konstrukce je relativně vysoká bezpečnost, článek je kovovým pouzdrem chráněn proti mechanickému poškození. Pouzdra jsou vybavována přetlakovým ventilem a někdy i termistorem typu PTC, který slouží jako nadproudová ochrana. Tato ochrana bývá použita u článků s menšími vybíjecími proudy, články s velkými vybíjecími proudy bývají většinou vyráběny bez termistoru. Nevýhodou válcových článků je jejich vyšší hmotnost a nedokonalé využití prostoru při skládání článků do baterií. Tato nevýhoda je kompenzována tím, že volný prostor mezi válcovými články může být použit pro proudění chladicího média během zatížení článků.

Válcové články jsou vyráběny v mnoha různých velikostech, velikost bývá označována pomocí pěti číslic. První dvě značí průměr článku v milimetrech, další tři udávají výšku článku v desetinách milimetru. Pravděpodobně nejrozšířenější velikosti jsou:

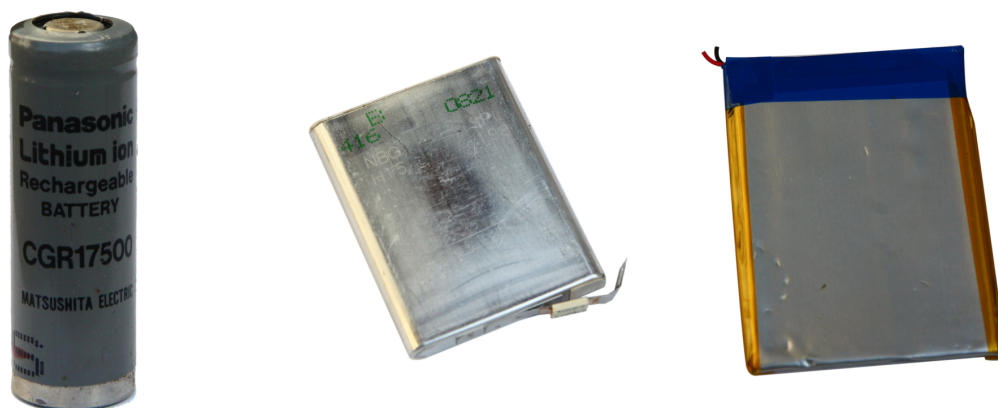
- 18650 – průměr 18 mm, výška 65 mm
- 26650 – průměr 26 mm, výška 65 mm

Prizmatické články Elektrody a separátor jsou položeny na sebe a smotány či nařezány tak, aby tvořily přibližně pravoúhlý tvar, a jsou vloženy do pevného obalu. Výhodou tohoto uspořádání je lepší využití prostoru při tvorbě akumulátorových baterií, Nevýhodou může být horší chlazení takto vytvořených baterií, pokud články doléhají těsně k sobě. Pro značení rozměrů tohoto typu článků neexistuje jednotný přístup, každý výrobce má vlastní velikosti i jejich značení.

Články v měkkém obalu Tvarově jsou články v měkkém obalu velmi podobné článkům prizmatickým, místo pevného obalu je použita jenom měkká plastová fólie. Výhodou těchto článků je nižší hmotnost, možnost výroby tenkých článků a do určité míry možnost je ohýbat. Velkou nevýhodou těchto článků je téměř nulová mechanická ochrana a s ní související riziko požáru při přílišné deformaci nebo prořazení článku. Stejně jako u prizmatických článků neexistují jednotné rozměry ani jednotné značení těchto článků.[6]

2.3 Používané technologie lithiových článků

Technologií lithiových článků jsou v této kapitole myšleny hlavně použité aktivní materiály elektrod. Tyto materiály mají zásadní vliv na výsledné vlastnosti článků. V následujících odstavcích jsou uvedeny nejpoužívanější materiály; v tabulce 2.1 jsou uvedeny typické hodnoty pro nejpoužívanější technologie.



Obr. 2.3: Druhy pouzder lithiových článků (zleva cylindrický, prizmatický a článek v měkkém obalu)

LCO Zkratka LCO je používána pro články s aktivní vrstvou kladné elektrody LiCoO_2 (lithium-kobalt-oxid), záporná elektroda je tvořena grafitem. První lithiové články byly založeny právě na této technologii. Výhodou této technologie je velká hustota uložené energie, nevýhodou jsou nízké nabíjecí a vybíjecí proudy, citlivost na zvýšenou teplotu, a také toxicita kobaltu. Články tohoto typu jsou postupně nahrazovány články založenými na technologii NMC a NCA.

LMO Aktivní vrstvou kladné elektrody je LiMn_2O_4 (lithium-mangan-oxid), záporná elektroda je tvořena grafitem. Výhodou těchto článků je nízký vnitřní odpor, schopnost dodávat vysoké proudy a odolnost proti vzplanutí. Nevýhodou je omezený počet nabíjecích a vybíjecích cyklů a nízká hustota uložené energie. Články tohoto typu jsou používány již jen ve speciálních aplikacích, v běžném použití jsou nahrazovány jinými typy. Pro náročné aplikace jsou kombinovány technologií NMC.

NMC Zkratka NMC je používána pro články s aktivní vrstvou kladné elektrody LiNiMnCoO_2 (nikl-mangan-kobalt). Záporná elektroda je tvořena grafitem, někdy s přídavkem křemíku. Poměrem mezi prvky Co, Ni a Mn je možné měnit chování článku, který je možné optimalizovat na vysoké vybíjecí proudy nebo na vysokou hustotu uložené energie.

LFP Jako aktivní materiál kladné elektrody je použit ve člancích LFP (lithium-železo-fosfát) LiFePO_4 . Hlavní výhodou těchto článků je jejich nízký vnitřní odpor, a tedy i schopnost dodat vysoké proudy, dále vysoká bezpečnost a určitá odolnost vůči přebíjení. Na rozdíl od ostatních lithiových článků jsou články LFP téměř nehořlavé a odolné vůči mechanickému poškození. Jejich hlavní nevýhodou je nižší

hustota uložené energie a nižší jmenovité napětí – 3,2 V (většina lithiových článků má jmenovité napětí 3,6 V – 3,7 V).

NCA V článcích typu NCA (nikl-kobalt-hliník) je použit jako aktivní materiál kladné elektrody LiNiCoAlO_2 . Charakteristika těchto článků je podobná jako u článků technologie NMC – tedy možnost vysokých vybíjecích proudů a nebo vysoká hustota uložené energie. Nevýhodou je vyšší cena a nižší bezpečnost.

LTO Zkratka LTO (lithium-titan-oxid) označuje články s aktivním materiálem záporné elektrody $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. Aktivním materiálem kladné elektrody může být LMO nebo NMC. Výhodou těchto článků je vysoká bezpečnost, možnost vysokých nabíjecích i vybíjecích proudů, výborná funkce i za velmi nízkých teplot a vysoký počet vybíjecích a nabíjecích cyklů. Nevýhodou těchto článků je nízké jmenovité napětí 2,4 V (většina lithiových článků má jmenovité napětí 3,6 V – 3,7 V), nízká hustota uložené energie a vysoká cena. [7]

Tab. 2.1: Srovnání technologií lithiových akumulátorů [7]

Technologie	Elektrody	Napětí [V]	Kapacita [Wh/kg]	Vybíjení*	Počet cyklů
LCO	LiCoO_2	3 – 4,2	150 – 200	1 C	500 – 1000
LMO	LiMn_2O_4	3 – 4,2	100 – 150	10 C	300 – 700
NMC	LiNiMnCoO_2	2,5 – 4,2	150 – 220	2 C	1000 – 2000
LFP	LiFePO_4	2,5 – 3,65	90 – 120	25 C	1000 – 2000
NCA	LiNiCoAlO_2	3 – 4,2	200 – 260	1 C	500
LTO	LMO, NMC ** $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ***	1,8 – 2,85	70 – 80	10 C	3000 – 7000

* Vybíjecí proud udáván v C – násobcích kapacity akumulátoru

** materiál katody

*** materiál anody

2.4 Parametry lithiových článků

V předchozí kapitole byly lithiové články popsány hlavně z hlediska principu funkce a použitých chemikálií. Pro uživatele nejsou uvedené údaje nezbytně nutné, mají spíš informativní charakter. Naopak, údaje popisované v této kapitole mají pro uživatele naprosto zásadní význam, protože popisují vlastnosti článku a definují to, jak má s články uživatel zacházet. Údaje uvádí výrobce článků v katalogovém listu, například Panasonic NCR18650PF [8], Sony US18650VTC5 [9] nebo A123 APR18650 [10].

2.4.1 Napětí

Výrobce udává pro každý článek několik hodnot napětí:

- Jmenovité napětí – článek je vybíjen definovaným proudem, jmenovité napětí je napětí, kterého článek dosáhl při polovině zbývající kapacity. Jedná se o jakési střední napětí článku, které leží přibližně v polovině mezi maximální nabíjecím napětím a minimálním vybíjecím napětím. Pro většinu článků Li-Ion je hodnota jmenovitého napětí v rozsahu 3,6 V – 3,7 V. Články založené na technologii LFP mají jmenovité napětí nižší – přibližně 3,3 V.
- Maximální nabíjecí napětí – hodnota, nad kterou nesmí napětí článku vystoupat během nabíjení. Pro většinu Li-Ion článků to je hodnota 4,2 V, pro články založené na technologii LFP je to obvykle hodnota 3,6 V. Výrobce vyžaduje přesné dodržování této hodnoty při nabíjení, jinak se výrazně snižuje životnost článku. Už při překročení o několik desetin Voltu může dojít požáru či výbuchu.
- Minimální vybíjecí napětí – hodnota, pod kterou by nemělo napětí článku poklesnout během vybíjení. Nejpozději při dosažení tohoto napětí by mělo být vybíjení článku ukončeno. Vybíjení článků pod mez stanovenou výrobcem výrazně snižuje jejich životnost. Typické hodnoty minimálních vybíjecích napětí pro články Li-Ion se pohybují v rozsahu 2 V – 3 V.

2.4.2 Kapacita

Výrobcem udávaná hodnota, která udává, jak velký elektrický náboj je možné do článku uložit a následně z něj zase odebrat. Většinou bývá udávána v Ah (Ampérhodiny), pomocí jmenovitého napětí článku lze též určit kapacitu článku v Wh (Watt hodiny). Pro porovnání různých článků někdy výrobce také uvádí měrnou kapacitu vztahenou na jednotku hmotnosti či na jednotku objemu. Typická kapacita Li-Ion článku v pouzdře 18650 se pohybuje v rozmezí 2000 mAh – 3000 mAh. Měrná kapacita bývá typicky 300 Wh/l – 700 Wh/l, respektive 150 Wh/kg – 230 Wh/kg.

2.4.3 Proud

Výrobce vždy udává maximální trvalý vybíjecí a nabíjecí proud článku, někdy také udává maximální proud pro rychlonabíjení a maximální špičkový vybíjecí proud. Proudů často nebývají udány v absolutních jednotkách – mA nebo A, ale jsou vztaheny ke jmenovité kapacitě článku a označovány písmenem C. Pokud je například maximální vybíjecí proud 5000 mA pro článek o kapacitě 2500 mAh, bývá v katalogu uvedeno, že vybíjecí proud takového článku je 2 C.

Vybíjecí proudy Li-Ion článků závisí na určení článku. Pro články o vysoké kapacitě bývají vybíjecí proudy typicky 1 C – 2 C, články uzpůsobené pro dodání vysokých proudů mohou mít vybíjecí proudy až 5 C – 10 C.

2.4.4 Počet cyklů

Někteří výrobci udávají počet vybíjecích a nabíjecích cyklů článku. Většinou bývá definován jako počet cyklů, po kterém dojde k poklesu kapacity článku na 80 % a výrobce udává podmínky, za kterých bylo tohoto počtu cyklů dosaženo (teplota, vybíjecí a nabíjecí proud, nabíjecí a vybíjecí napětí). Odchyly počtu cyklů dosažované v praxi jsou způsobeny právě odlišností těchto parametrů. Běžný Li-Ion článek má životnost 300 – 1000 cyklů.

2.4.5 Teploty

Výrobce udává rozsah teplot, ve kterých je možné článek vybíjet, nabíjet a případně skladovat. Rozsah teplot bývá přibližně 0 °C – 60 °C. Pokud jsou články provozovány mimo povolený rozsah, dochází ke snižování jejich životnosti a při výraznějším překročení horní hranice může dojít i k požáru.

2.5 Tvorba akumulátorových baterií

Typický lithiový článek má jmenovité napětí 3,6 V a dokáže dodat proud v řádu jednotek ampér. Pro napájení malých zařízení, jako jsou mobilní telefony či MP3 přehrávače jsou tyto parametry dostačující. Pro napájení větších zařízení je nutné však lithiové články spojovat do baterií, aby mohly poskytnout vyšší napětí a/nebo proud. Články mohou být spojovány sériově i paralelně, případně lze oba tyto způsoby zkombinovat do sério-paralelního zapojení. Aby baterie správně fungovala, je nutné zajistit splnění parametrů, které udává výrobce, *a to pro každý článek*. Do baterie se spojují vždy jenom články jednoho výrobce a shodného typu. Články by měly mít co nejmenší rozptyl parametrů, je tedy vhodné, aby všechny pocházely ze stejné série.

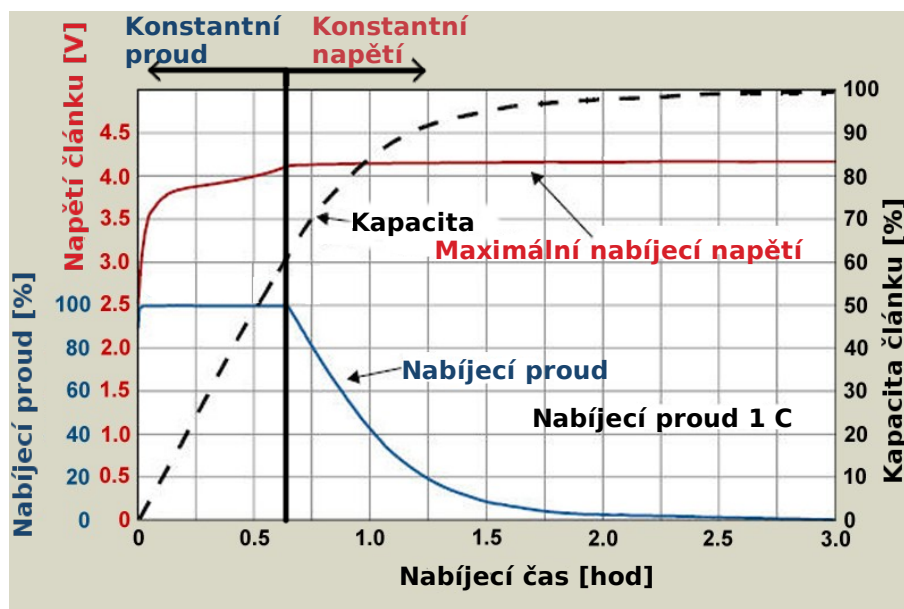
Baterie z lithiových článků jsou skoro vždy doplňovány elektronickými obvody, které monitorují nejen stav baterie jako celku, ale i jednotlivých článků. Hlavním úkolem těchto obvodů je monitorovat parametry (napětí, proud, teplotu), jestli jsou v přijatelných mezích. V případě překročení nastavených limitů musí obvody provést odpovídající akci, aby nebyla ohrožena bezpečnost, nedocházelo ke zbytečnému namáhání a zkracování životnosti některých článků. Dalším úkolem těchto obvodů je zjišťování zbývajících kapacity (SOC) a celkového stavu článku (SOH).

2.6 Nabíjení

Lithiové články jsou vždy nabíjeny metodou CC-CV (constant current, constant voltage). Časový průběh nabíjení je zobrazen na Obr. 2.4. V první fázi je článek nabíjen konstantním proudem až do dosažení maximálního nabíjecího napětí (toto napětí udává výrobce a nejčastěji bývá 4,2 V). V druhé fázi nabíjení je toto napětí udržováno do té doby, než nabíjecí proud klesne pod hodnotu udávanou výrobcem (tzv. cut-off current, typicky 50 mA – 100 mA, respektive 0,1 C – 0,02 C). Po poklesu proudu pod tuto hodnotu musí být nabíjení ukončeno, aby nedocházelo k přebíjení článku.

Běžný nabíjecí proud udávaný výrobcem bývá v rozsahu 0,5 C – 1 C. Pro některé články povoluje výrobce také rychlonabíjení; proud pak je v rozsahu 2 C – 3 C. Během rychlonabíjení je dosaženo druhé fáze nabíjení (konstantní napětí) dříve, ale tato fáze pak trvá déle než při běžném nabíjení.

Během nabíjení je nejpřísněji sledovaným parametrem maximální nabíjecí napětí, které má hodnotu obvykle 4,2 V a je vyžadováno ho dodržet s velkou přesností, výrobce obvykle udává toleranci ± 50 mV. Dalším sledovaným parametrem během nabíjení je teplota článků, která by neměla být vůči okolní teplotě vyšší než 5 °C – 10 °C. Nabíjení Li-Ion článků je proces s velkou účinností a k zahřívání by proto docházet nemělo. Zahřívání článku při nabíjení ukazuje na zvýšení jeho vnitřního odporu a pravděpodobně zhoršenou kondici článku. Kromě nadměrného zahřívání během nabíjení může být pro některé typy článků nebezpečné i nabíjení při nízkých teplotách. [11]



Obr. 2.4: Nabíjení lithiového článku [11]

2.7 Ochrany

Li-ion články jsou moderní technologie, která pro svou správnou a bezpečnou funkci vyžaduje určitý způsob zacházení. Z hlediska bezpečnosti je hlavním problémem Li-ion článků možnost vznícení při překročení určité teploty. V případě článků s pevným obalem hrozí také nárůst tlaku uvnitř článku a exploze. Požár či exploze hrozí i při mechanickém poškození článku (proražení či deformaci). Z hlediska životnosti článků jsou důležitými parametry maximální nabíjecí napětí, minimální vybíjecí napětí, odebíraný proud a teplota článku. Čláčkům je tedy potřeba zajistit dostatečnou mechanickou ochranu a pečlivě monitorovat uvedené veličiny, zda nedochází k překračování povolených hodnot.

2.7.1 Ochrany integrované v článku

Většina lithiových článků obsahuje kromě elektrod a elektrolytu ještě několik ochran. Tyto ochrany jsou přítomny výhradně kvůli zajištění bezpečnosti článku a jedná se o jakousi poslední záchranu, když všechny nadřazené bezpečnostní systémy selžou. Jejich funkce bývá v některých případech jednorázová a po spuštění ochrany je článek nefunkční.

PTC *Positive temperature coefficient*. Většina článků obsahuje PTC – polovodičovou součástku, která při svém zahřátí výrazně zvýší svůj odpor. PTC je zapojeno do série s článkem. Při překročení určitého proudu dojde k zahřátí PTC, zvýšení jeho odporu, čímž se navenek zvýší vnitřní odpor článku a omezí se procházející proud. Tato ochrana je vratná, po odeznění nadproudu dojde ke zchladnutí PTC a snížení jeho odporu na velmi nízkou hodnotu. Články uzpůsobené pro odběr vysokých proudů PTC většinou neobsahují, aby bylo docíleno co nejmenšího vnitřního odporu.

CID *Current interrupt device*. Zařízení integrované uvnitř článku, které přeruší elektrický obvod v případě, že dojde uvnitř článku k výraznému nárůstu tlaku. Nárůst tlaku je spojován s nárůstem teploty, a tedy rizikem vzplanutí či exploze. Pokud je nárůst tlaku uvnitř článku způsoben zkratem a nadproudová ochrana nereaguje či není přítomná, CID odpojí článek. Odpojení bývá většinou nevratné a článek je nutno vyměnit za nový.

Pojistný ventil V případě dalšího nárůstu tlaku uvnitř článku i po spuštění CID je vybaven článek pojistným ventilem, který se otevře a nahromaděný tlak uvolní. Je tak zabráněno explozi, ale uvolněné látky (hlavně elektrolyt) jsou hořlavé a může dojít ke vzplanutí.

Separátor Aby nedošlo k dotyku kladné a záporné elektrody, je mezi ně vložena tenká nevodivá vrstva, která propouští lithiové ionty a nebrání tak elektrochemické reakci. Speciální úpravou separátoru je možné docílit jeho tavení při dosažení nebezpečné teploty. Separátor se stane pro lithiové ionty neprostupný, elektrochemická reakce je přerušena a článek přestane dodávat elektrický proud. Tím by mělo být zamezeno dalšímu zahřívání článku a jeho vzplanutí či explozi. Funkce této ochrany je rovněž nevratná a po jejím spuštění je nutno článek vyměnit za nový.

2.7.2 Elektronické ochrany

Další úrovní ochrany lithiových článků jsou elektronické ochrany, které jsou nedílnou součástí baterie, případně napájeného zařízení. Tyto ochrany bývají často označovány jako BMS, což ale není úplně přesné. Přesnější popis situace je, že jedním z úkolů BMS je ochrana článků baterie a zajištění jejich maximální životnosti. Kromě toho může mít BMS i další funkce.

Základním principem ochrany pomocí BMS je to, že BMS má možnost odpojit baterii od zátěže nebo od nabíječky v případě překročení některého ze sledovaných parametrů. Odpojení je realizováno pomocí elektromagnetického relé a nebo pomocí polovodičového spínače tvořeného nejčastěji tranzistorem MOS-FET. BMS monitoruje parametry baterie a jednotlivých článků v první řadě z hlediska bezpečnosti, ale bere v úvahu i životnost baterie, což přidává sledování některých dalších veličin či zpřísnuje limity pro veličiny již sledované.

Maximální nabíjecí napětí Výrobce definuje napětí, které nesmí článek přesáhnout. Při malém překračování tohoto napětí dochází ke snižování životnosti článku, při jeho větší překročení hrozí nebezpečí přehřátí a požáru či výbuchu článku. Kvůli určitým rozdílům v parametrech článků jedné baterie se její celkové napětí nerozdělí mezi články rovnoměrně. Nestačí tedy monitorovat celkové napětí baterie, je nutné monitorovat každý článek zvlášť a při překročení maximálního nabíjecího napětí je baterii nutné odpojit od nabíječky. V některých případech je vhodné prodloužit baterie na úkor její kapacity. Maximální nabíjecí napětí je tehdy voleno nižší, než požaduje výrobce.

Minimální vybíjecí napětí Výrobce udává napětí, pod jehož hodnotu by neměl být článek vybíjen. Tato mez není spojena s žádným větším bezpečnostním rizikem, ale vybíjení článku pod povolenou hodnotu výrazně snižuje jeho životnost. Podobně jako u maximálního nabíjecího napětí, je možné nastavit i hodnotu minimálního vybíjecího napětí přísněji – tedy na vyšší hodnotu. Tím se prodlouží životnost článku, ale na úkor jeho kapacity.

Nabíjecí a vybíjecí proud Proudly baterie jsou monitorovány hned z několika důvodů:

- Bezpečnost – při výrazném překročení proudu udávaného výrobcem může dojít k přehřátí článku a jeho vzplanutí či výbuchu.
- Životnost – vybíjení či nabíjení článků vysokými proudy vede k jejich zvýšenému namáhání a zkracování životnosti. V některých případech je vhodné hodnoty proudů snížit pro zvýšení životnosti.
- Sledování stavu článku – pro určení SOC a SOH je nutné znát proud, jeho integrací se určuje prošlý náboj. Nejedná se přímo o funkci ochrannou, ale spíše uživatelskou.

V případě spojování více článků paralelně přichází problém rozdělení proudu mezi jednotlivé články paralelní kombinace. Monitorování proudu každým článkem zvlášť by bylo velmi nákladné, a proto se v praxi spoléhá na to, že rozptyl parametrů článků bude malý a proud se rozdělí rovnoměrně alespoň přibližně. Pokud jsou rozdíly mezi články malé, přirozeně se jejich parametry vyrovnávají. Článkem s nejmenším vnitřním odporem prochází nejvyšší proud, takže je nejvíce namáhán, nejrychleji stárne a jeho vnitřní odpor se zvyšuje, dokud se nedostane na úroveň ostatních článků.

Teplota Dalším ze sledovaných parametrů je teplota. Ta má přímou vazbu na bezpečnost, protože při překročení teploty $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází k teplotní nestabilitě článku a hrozí vzplanutí či exploze článku. Při rychlém vybíjení článků se část jejich energie mění na teplo na jejich vnitřním odporu. Pokud není zajištěno dostatečné chlazení, teplota může překročit povolenou mez a elektronická ochrana musí zátěž odpojit.

Teplota bývá sledována i z důvodu životnosti článků, při jejich provozování nad teplotou $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ výrazně klesá jejich životnost, teplota $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ je již považována za nebezpečnou. Některé typy článků také nesmějí být nabíjeny při nízkých teplotách, opět kvůli životnosti.[12]

2.8 Balancování

Problematika balancování je přímo spojena s tvorbou akumulátorových baterií a týká se těch baterií, kde jsou články (případně skupiny článků) spojeny do série. Články nejsou nikdy úplně identické, již od výroby jsou mezi nimi drobné rozdíly. Tyto rozdíly se mohou v průběhu času zvyšovat. Články s horšími parametry jsou více namáhány a tím se jejich parametry ještě více zhoršují. Články geometricky umístěné uprostřed baterie jsou většinou více tepelně namáhány než ty na okraji a dochází

u nich k rychlejšímu zhoršování parametrů. Z hlediska balancování je podstatný rozdíl ve skutečné kapacitě jednotlivých článků a v jejich samovybíjení. Protože jsou články spojeny do série, je při jejich vybíjení vždy odebrán ze všech stejný náboj a při nabíjení do všech stejný náboj dodán.

Náboj, který je schopna baterie dodat, je tedy omezen článkem, který má aktuálně nejnižší náboj. Po odebrání tohoto náboje z baterie poklesne napětí tohoto článku pod minimální vybíjecí napětí a zátěž musí být odpojena, aby nedošlo ke zničení tohoto článku, a to i přestože v některých dalších člancích baterie ještě náboj zbývá. Při nabíjení baterie je situace obdobná, náboj, který je schopna baterie přijmout je omezen článkem, kterému zbývá do plného nabití nejméně kapacity. Může se jednat o stejný článek, jako v předchozím případě, ale nemusí to tak být vždy.

Pro využití celé kapacity baterie je tedy potřeba zajistit, aby se náboj dostal do ostatních článků, přestože jeden článek už je plně nabitý. Toto je úkol balancování. V případě aktivního balancování je náboj z nejvíce nabitého článku přesunut do ostatních článků. Pokud je použito pasivní balancování, pak jsou více nabitě články vybíjené připojením rezistorů do té doby, než se všechny články dostanou přibližně na stejnou úroveň nabití. Baterie tedy může být dále dobíjena, až jsou plně nabitě všechny články. Při následném vybíjecím cyklu je k dispozici plná kapacita baterie.

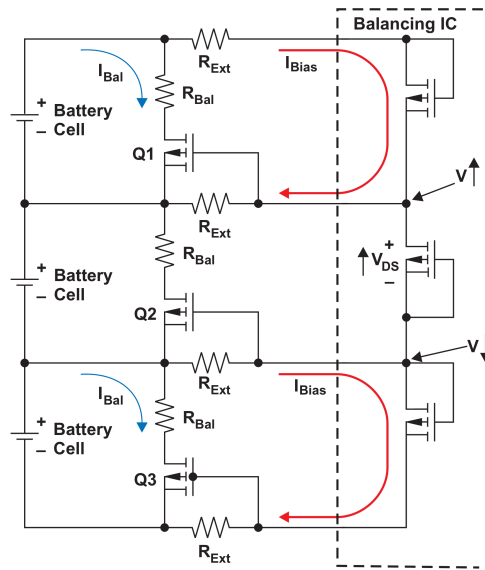
2.8.1 Pasivní balancování

Princip pasivního balancování spočívá v tom, že články s nejvyšším nábojem jsou připojením rezistoru vybíjeny tak, aby nebránily ostatním článkům v plném nabití. Schéma zapojení za uvedeno na Obr. 2.5. V praxi není náboj jednotlivých článků většinou znám právě kvůli rozdílnému samovybíjení článků. Balancování se tedy provádí podle SOC, který se určuje z napětí jednotlivých článků. K článkům, které mají nejvyšší napětí (a tedy nejvyšší SOC) je připojen rezistor do té doby, než jejich napětí klesne na úroveň ostatních článků.

Výhodou pasivního balancování je jeho jednoduchost. Pro každý článek v sérii stačí jeden rezistor a jeden spínací prvek, který tento rezistor připojí paralelně k článku v případě, že je potřeba balancovat. Nevýhodou pasivního balancování je to, že energie z více nabitých článků je v rezistorech přeměněna na teplo a nemůže už být využita.

2.8.2 Aktivní balancování

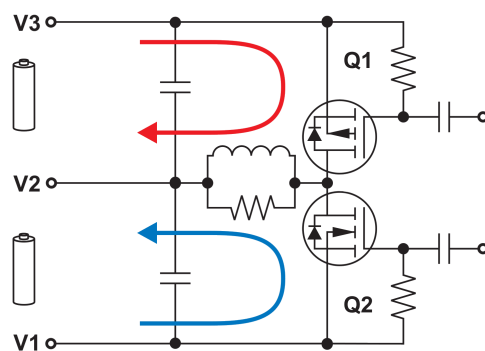
Aktivní balancování, na rozdíl od pasivního, nemění nadbytečnou energii v odporech na teplo, ale náboj mezi články přesouvá pomocí DC-DC měničů. Příklad zapojení aktivního balancéru je uveden na Obr. 2.6. Mezi kterými články se bude náboj přesouvat je určeno, stejně jako u pasivního balancování, podle napětí na jednotlivých



Obr. 2.5: Schéma zapojení pasivního balancování [13]

článcích. Náboj z článků s nejvyšším napětím je přesouván do článků s napětím nejnižším.

Hlavní výhodou aktivního balancování je jeho energetická šetrnost. Energie z více nabitých článků je přesouvána do článků méně nabitých místo toho, aby byla přeměňována na teplo. Druhou výhodou je, že aktivní balancování umožní odebrat úplně všechnu energii, která je v baterii uložena, a to i přesto, že všechny články zapojené do série nemají stejný náboj. Nevýhodou aktivního balancování je vyšší obvodová složitost. Pro baterie zatěžované velkými proudy je nutné odpovídajícím způsobem aktivní balancér dimenzovat, aby stačil přesouvat náboj mezi články a skutečně platilo, že z baterie je možné odebrat všechnu uloženou energii.[13], [14]



Obr. 2.6: Schéma zapojení aktivního balancování [13]

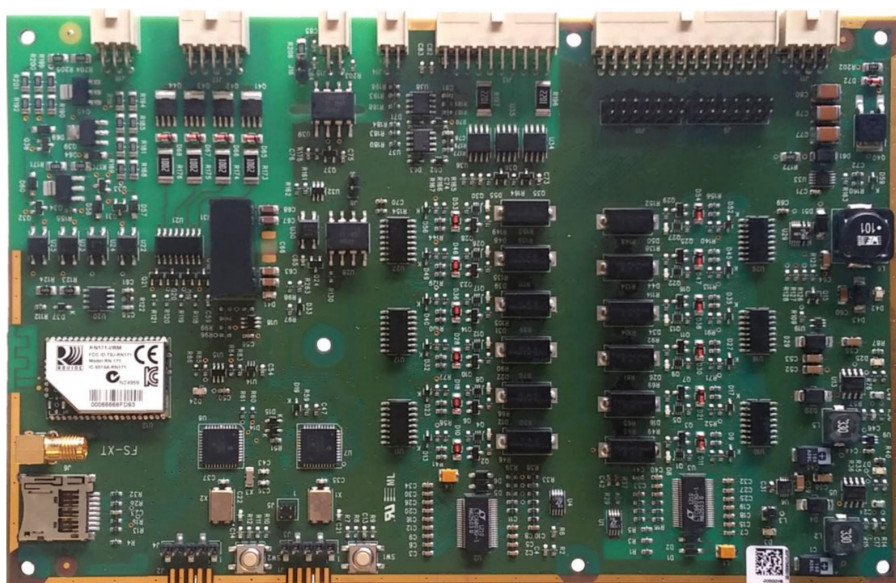
3 SYSTÉMY BMS DOSTUPNÉ NA TRHU

V následujících několika podkapitolách jsou stručně představeny některé, již existující, systémy BMS. Pro porovnání byly zvoleny takové BMS, které mají podobné parametry a funkcionalitu, jakou bude mít navrhovaný systém BMS. Hlavními společnými rysy jsou:

- 5 – 20 lithiových článků zapojených do série
- Měření napětí na každém článku v sérii
- Pasivní balancování proudem přibližně 100 mA
- Realizace všech potřebných ochran
- Výpočet SOC, případně i SOH
- Možnost komunikace s nadřazeným systémem

3.1 Freemens Freesafe FS-XT

BMS systém francouzské firmy Freemens určený pro elektrická vozidla, záložní zdroje elektrické energie a přenosná elektrická zařízení. Jeden BMS modul umožňuje připojení 5-ti až 24 článkové baterie, moduly je možné spojovat do série i mezi sebou až do celkového napětí baterie 840 V. BMS umožňuje pasivní balancování výkonem až 2,5 W na článek a má implementované všechny potřebné druhy ochran. Pro měření proudu používá externí proudový senzor a k odpojování zátěže či nabíječky jsou používány elektromagnetická relé. Systém disponuje širokými možnostmi nastavení, logování a komunikace (WiFi, CAN Bus). [15]



Obr. 3.1: Freemens Freesafe FS-XT [15]

3.2 Orion Jr.BMS

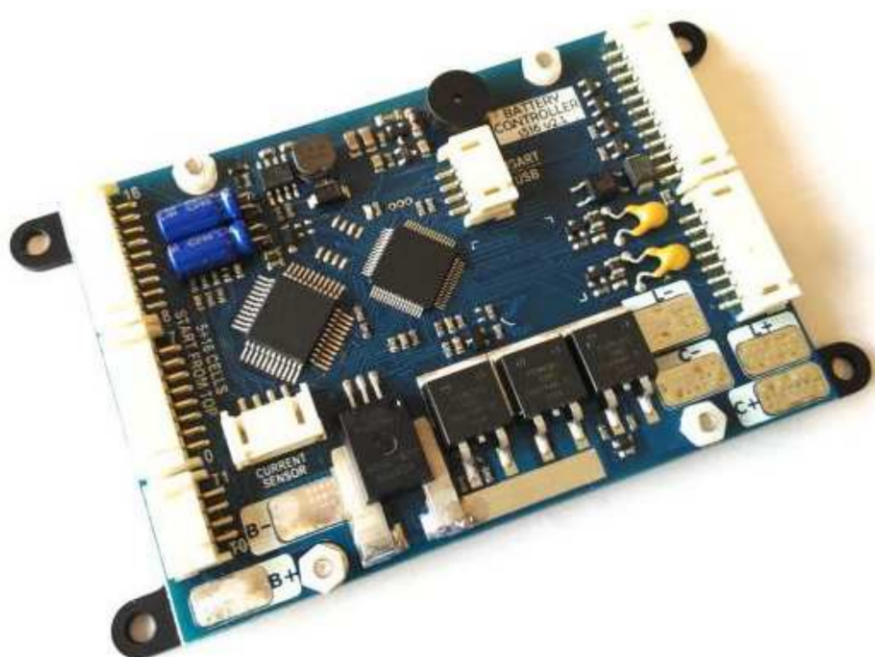
Orion Jr.BMS je výrobkem americké firmy Ewert Energy Eystems, která se zabývá elektrickými vozidly, energetikou a problematikou ukládání elektrické energie. Orion Jr. BMS je nejmenší BMS systém z jejich nabídky. Je určen pro baterie o maximálně 16 článcích v sérii. Implementovány jsou všechny potřebné druhy ochrany, pro svou funkci potřebuje BMS externí proudové čidlo a pravděpodobně relé pro odpojení zátěže. BMS umožňuje pasivní balancování článků baterie proudem až 150 mA. Jsou implementovány algoritmy výpočtu SOC, SOH a měření vnitřního odporu každého článku. Z komunikačních rozhraní jsou přítomny CAN Bus a RS-232, BMS také podporuje diagnostický protokol OBD2. [16]



Obr. 3.2: Ewert Energy Systems – Orion Jr. BMS [16]

3.3 Energus Tiny BMS

Energus Power Solutions je firma litevského původu specializující se na výrobu baterií pro elektrická vozidla. Systém Tiny BMS je určen pro baterie o 4 – 16 článcích. Stejně jako předchozí uvedené systémy má implementovány všechny potřebné druhy měření a ochrany a umožňuje pasivní balancování článků proudem 100 mA. Pro svou funkci nevyžaduje externí čidlo proudu ani elektromagnetické relé. Měření proudu je součástí plošného spoje BMS a odpojování zátěže či nabíječky je prováděno pomocí tranzistorů. Za povšimnutí stojí také rozměry plošného spoje, jeho šířka je 65 mm, je tedy shodná s výškou článků 18650. K dispozici jsou komunikační rozhraní USB, CAN, UART a Bluetooth. Dále je implementován algoritmus odhadu SOC. [17]



Obr. 3.3: Energus Power Solutions – Tiny BMS [17]

4 POŽADAVKY NA NAVRHOVANÝ SYSTÉM

Tato kapitola obsahuje seznam požadavků, které jsou na navrhovaný monitorovací systém baterie kladeny. Požadavky jsou založeny na výše diskutovaných vlastnostech lithiových článků a na principech známých z již existujících BMS systémů. Požadavky byly stanoveny ve spolupráci se společností siliXcon tak, aby navržený systém byl schopný spolupracovat s jejími dalšími produkty. Hlavní oblastí použití navrhovaného monitorovacího systému jsou elektrická kola a lehké elektrické motocykly. Přestože by navrhovaný systém měl být co nejuniverzálnější, jeho návrh bude optimalizován právě pro tuto skupinu.

4.1 Požadované funkce

Ochrany Nejdůležitějším úkolem navrhovaného systému je chránit lithiové články před rizikovými stavy – tedy zajistit, aby byly dodržovány všechny požadavky, které pro zaručení správné funkce stanovuje výrobce. Použity musí být následující ochrany:

- Ochrana proti nadproudu a zkratu – v případě překročení nastaveného vybíjecího či nabíjecího proudu bude odpojena zátěž, respektive nabíječka.
- Ochrana proti přebití – v případě překročení maximálního nabíjecího napětí na některém článku během nabíjení bude nabíječka odpojena.
- Ochrana proti hlubokému vybití – v případě poklesu napětí některého článku pod hodnotu minimálního vybíjecího napětí bude odpojena zátěž.
- Teplotní ochrana – pokud bude teplota baterie mimo povolené meze, bude odpojena zátěž i nabíječka.

Balancování Pro využití co největší kapacity baterie bude navrhovaný systém umožňovat balancování jednotlivých článků. Podle [14] je pro běžné lithiové baterie dostatečný balancovací proud přibližně 100 mA. Balancovací proud navrhovaného systému bude tedy podobný.

Monitorování stavů baterie Navrhovaný systém bude měřit napětí na každém z článků zapojených do série, dále bude měřit celkové napětí baterie, odebíraný proud a teploty uvnitř baterie. Z měřených hodnot bude určován SOC – stav nabití baterie a SOH – stav životnosti baterie.

Komunikace Monitorovací systém bude vybaven komunikačními rozhraními USB a CAN Bus. Rozhraní budou použita pro nastavení vnitřních parametrů systému

a v případě potřeby budou rovněž použita pro odesílání stavů (napětí, proud, teplota, SOC a SOH) do nadřazeného systému.

Přednabití kapacitní zátěže Navrhovaný systém bude v drtivé většině případů provozován s tranzistorovým měničem jako zátěží. Aby při připojení takové zátěže nedocházelo k proudovým rázům, jiskření a případně vybavování nadproudové ochrany vlivem nabíjení kondenzátorů meziobvodu, bude navrhovaný monitorovací systém vybaven na výstupu funkcí přednabití kapacitní zátěže.

4.2 Elektrické parametry

Počet článků a maximální napětí Navrhovaný systém je určen pro baterie tvořené až 18 lithiovými články zapojenými v sérii. Při použití běžných článků to znamená jmenovité napětí 64,8 V a maximální nabíjecí napětí až 75,6 V. Systém by měl být jednoduše modifikovatelný pro baterie s nižším i vyšším počtem článků.

Proud Maximální odebíraný proud z baterie bude v rozsahu přibližně 50 A – 100 A. Vzhledem k plánovanému použití navrhovaného systému v elektrických vozidlech lze předpokládat relativně malý trvalý odběr proudu s velkými proudovými špičkami (například při rozjezdu vozidla).

Ztrátový výkon U navrhovaného zařízení se předpokládá montáž dovnitř baterie, odkud je špatný odvod tepla. Navíc jsou články samy o sobě zdrojem tepla. Navrhovaný systém by měl mít tedy dlouhodobě ztrátový výkon v řádu jednotek Wattů. Při krátkodobých proudových špičkách mohou být ztráty vyšší, podmínkou je dobré chlazení a nebo alespoň dostatečná tepelná kapacita nejbližšího okolí, aby nedošlo k velkému nárůstu teploty.

4.3 Další požadavky

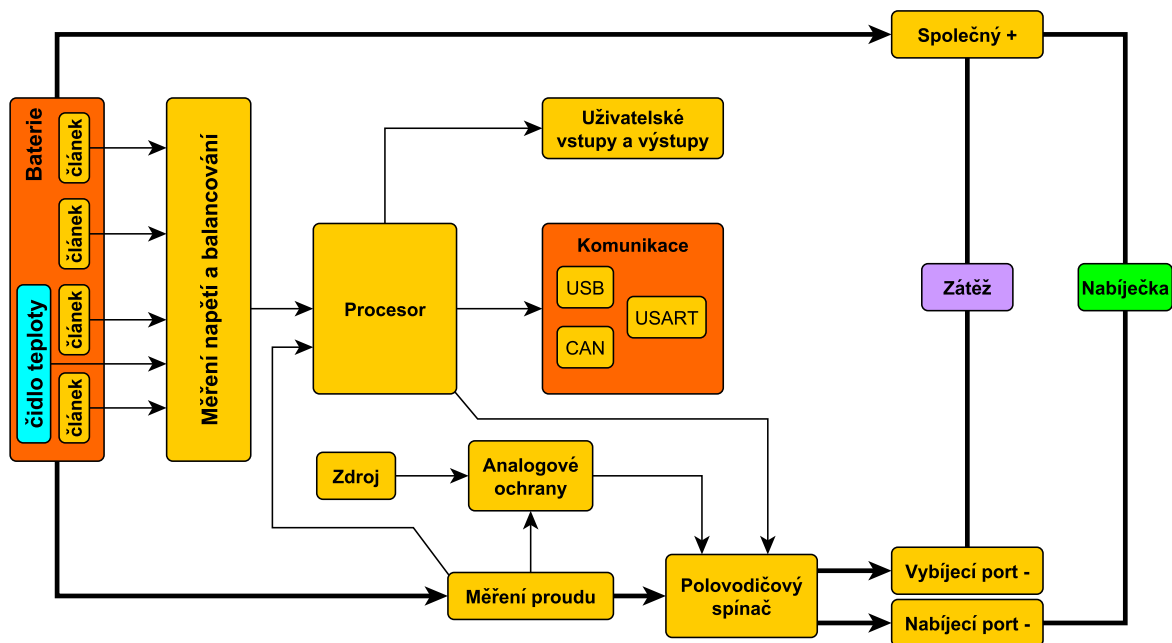
Rozměry Navrhovaný systém je určen pro integrování do baterií, které jsou tvořeny z článků 18650 případně 26650. Šířka plošného spojení musí být menší, než je výška těchto článků – tedy 65 mm.

Oddělený nabíjecí a vybíjecí port Navrhovaný systém bude mít oddělený nabíjecí a vybíjecí port. Odpojení nabíječky bude obousměrné, odpojení nabíječky bude znamenat ukončení nabíjení a zároveň ochranu před vybíjením skrz nabíječku, pokud dojde k vypnutí nabíječky nebo její poruše. Odpojení zátěže bude pouze jednosměrné – odpojení zamezí odběru proudu z baterie, ale nezamezí dodání proudu do baterie.

Tato vlastnost chrání tranzistorový měnič. Při vypnutí měniče musí být energie akumulovaná v cívkách motoru přesunuta zpět do baterie. Kondenzátory meziobvodu tranzistorového měniče nemusí mít dostatečnou kapacitu na to, aby všechnu energii z cívek absorbovaly bez nebezpečného nárůstu napětí v případě náhlého odpojení baterie.

5 KONCEPCE SYSTÉMU

V předchozí kapitole byly definovány požadavky na navrhovaný systém BMS. Jako první krok pro splnění těchto požadavků je nutné navrhnout základní koncepci celého systému. V této kapitole je navržený koncept představen a popsán včetně jeho nejdůležitějších částí.



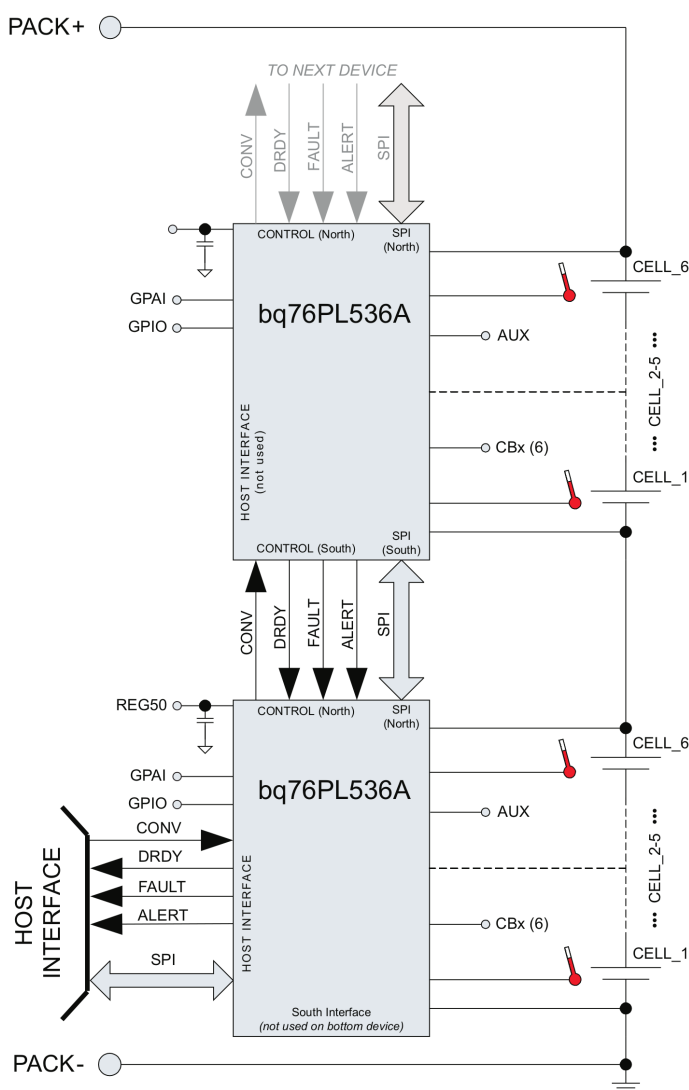
Obr. 5.1: Blokové schéma navrženého systému

Blokové schéma navrženého systému je uvedeno na Obr. 5.1. Z baterie osazené navrženým systémem BMS jsou vyvedeny celkem tři silové vývody. Společný kladný pól je natrvalo připojen přímo ke kladnému pólu článků baterie. Záporný pól je přes polovodičový spínač připojen ke zbývajícím dvěma vývodům – nabíjecímu a vybíjecímu portu. Systém dále obsahuje měřicí a řídicí obvody, jejichž stručný popis je uveden v následujících částech této kapitoly.

5.1 Měření napětí a balancér

Pro měření napětí jednotlivých článků a spínání balancovacích rezistorů existují různé jednoúčelové integrované obvody, například AD7280A od firmy Analog Devices nebo BQ76PL536A od firmy Texas Instruments. Obvody komunikují s procesorem, předávají mu naměřené hodnoty napětí a podle požadavků spínají balancovací

Jednouúčelové měřicí obvody mají většinou vstupy pouze pro menší počet článků – například obvod BQ76PL536A má vstupy pouze pro šest článků v sérii. Aby bylo možné připojit víc článků, obvody je možné řadit „nad sebe“ a propojit mezi sebou jejich komunikační rozhraní. Obvody s touto vlastností se označují jako *stackable* (česky tedy „štosovatelné“).



Obr. 5.2: Princip zapojení více měřicích obvodů – „štosování“ [18]

5.2 Procesor

Hlavním řídicím členem celého BMS systému je procesor. Vyhodnocuje naměřené hodnoty napětí, proudu a teploty a v případě překročení povolených limitů zasahuje. Kromě toho vyhodnocuje z měřených dat stav nabití baterie (SOC) a její celkovou kondici (SOH). Procesor může dále komunikovat s dalšími systémy a obsluhovat uživatelské vstupy a výstupy. Zvláštní pozornost bude muset být věnována programu v procesoru. Procesor s programem bude v zařízení působit jako bezpečnostní prvek, chyby v programu či jeho zamrznutí je nepřípustné.

5.3 Polovodičový spínač

Jak bylo uvedeno dříve, baterie osazená navrhovaným systémem BMS má celkem tři silové vývody. Kladný pól baterie je propojený natrvalo. Záporný pól je veden do polovodičového spínače a rozdělen na dva výstupy – vybíjecí port a nabíjecí port. Vybíjecí port slouží *pouze* k připojení zátěže k baterii, nabíjecí port je určen k připojení nabíječky. Použití jednosměrně odpojovaného vybíjecího portu má dva důvody:

Ekonomický V polovodičovém spínači budou použity výkonové tranzistory MOS-FET, které mají vždy antiparalelní substrátovou diodu a umožňují rozpojení pouze pro jeden směr proudu. Aby mohlo být rozpojení obousměrné, bylo by nutné zapojit dva tranzistory antisériově, což by znamenalo, mimo jiné, dvojnásobný odpor $R_{DS(on)}$. Pro snížení odporu na původní hodnotu by bylo nutné přidat paralelně ještě jednu dvojici tranzistorů. Cena zařízení by tak znatelně narostla, protože výkonové tranzistory jsou jedny z nejdražších použitých součástek.

Bezpečnostní Pouze jednosměrné odpojení poskytuje ochranu proti přepětí ve střídači, který bude typicky zapojen jako zátěž. Pokud by BMS systém vyhodnotil chybu a zátěž (střídač s připojeným motorem) za chodu nečekaně odpojil obousměrně, magnetická energie z cívek měniče by mohla způsobit přepětí v meziobvodu měniče. Pokud je zátěž odpojena jenom jednosměrně, energii z cívek měniče je možno vrátit zpět do baterie. Tato energie je pro baterii malá a nepředstavuje nebezpečí.

Přítomnost vybíjecího portu, který je odpojován jenom jednosměrně v sobě nese dvě jiná bezpečnostní rizika. První je, že přes vybíjecí port se nikdy nesmí baterie nabíjet, protože v případě poruchy nabíječky nebo chybně nastaveného konečného nabíjecího napětí nemá BMS žádnou možnost, jak nabíjení ukončit, a zabránit tak přehřívání článků. Druhé riziko je prvním velmi podobné – připojený střídač s motorem nesmí energii do baterie vracet dlouhodobě (například brzdění motorem při

jízdě z kopce), pokud je baterie plně nabitá a hrozilo by překročení maximálního povoleného napětí článků. BMS tedy musí se střídačem komunikovat a nebo mít jiný způsob, jak střídač odpojit. Pro jednorázové odpojení v případě nouze je možné použít speciální pojistku. Tato pojistka se může roztavit a přerušit obvod jednak průchodem nadproudu jako klasická pojistka a nebo je roztavena připojením napětí na pomocný vstup.

5.4 Analogové ochrany

Úkolem analogových ochran je reagovat na situace, které by mohlo být obtížné procesorem dostatečně rychle vyhodnotit. Jedná se hlavně o ochranu proti zkratu, která musí reagovat okamžitě a v případě zkratu výstup co nejrychleji odpojit. Další důležitou ochranou je ochrana proti podpětí napájecího zdroje, která v případě poklesu napájecího napětí odpojí zátěž, dokud je ještě dostatek energie k bezpečnému vypnutí MOS-FET tranzistorů, ze kterých je polovodičový spínač sestaven. Zapůsobení některé z ochran je rovněž hlášeno do procesoru. Analogové ochrany je možné realizovat pomocí diskrétních součástek a nebo je možné využít obvody vestavěné v procesoru – DAC převodník a analogové komparátory v procesoru jsou určeny přesně pro tento typ aplikací.

5.5 Provozní režimy a napájení

Navrhovaný systém BMS bude mít dva hlavní provozní režimy:

- Normální režim – všechny obvody jsou aktivní, probíhá neustále měření a monitorování. Spotřeba je v řádu jednotek Wattů, v porovnání s aktuální spotřebou zátěže je vlastní spotřeba BMS zanedbatelná.
- Režim spánku – většina obvodů je neaktivních, měření a monitorování probíhá pouze jednou za dlouhý časový úsek, kdy se systém aktivuje, provede měření a je opět uspán. Spotřeba v režimu spánku je minimální, měla by být srovnatelná se samovybíjením článků. V tomto režimu je monitorován odběr proudu, v případě odběru přejde systém do normálního režimu.

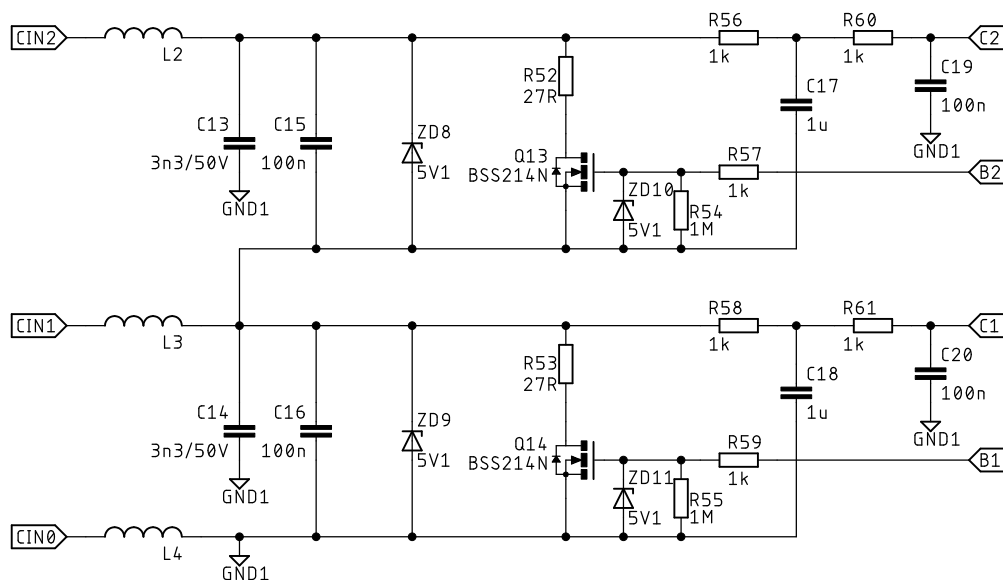
Uvedeným režimům odpovídá i koncepce napájení zařízení. Během normálního režimu bude aktivní hlavní napájecí zdroj, který bude zásobovat energií všechny obvody. V případě přechodu do režimu spánku bude tento zdroj vypnut společně s většinou obvodů. Aktivní zůstane jenom pomocný napájecí zdroj, který bude napájet procesor a obvody nutné k detekci připojení zátěže.

6 NÁVRH SCHÉMAT ZAPOJENÍ

Na základě koncepce systému BMS popsaného v předchozí kapitole byly vybrány klíčové součástky a navržena schémata zapojení, které jsou uvedena dalších částech této kapitoly. Aby byl patrný princip funkce jednotlivých částí, schémata byla zjednodušena (například místo použití čtyř paralelně zapojených tranzistorů je zakreslen jenom jeden). Úkolem uvedených schémat je vysvětlení funkce celého systému, nejsou zamýšlena jako výrobní dokumentace.

6.1 Měření napětí a balancování

Pro měření napětí článků a balancování byl zvolen jednoúčelový obvod BQ76PL536A firmy Texas Instruments. Jeden obvod umožňuje měření a balancování tří až šesti lithiových článků, dále disponuje dvěma vstupy pro teplotní čidlo typu NTC a jedním uživatelským výstupem. V případě požadavku na měření více než šesti článků v sérii je možno tyto integrované obvody spojovat, aby navenek tvořily jediný celek s požadovaným množstvím vstupů a výstupů. Toto spojování („štosování“) je blokově znázorněno v předchozí kapitole na Obr. 5.2. Obvod na nejnižším potenciálu je propojen s procesorem přes sběrnici SPI a s obvodem „nad“ ním, další obvody jsou vždy spojeny s obvodem „pod“ sebou a „nad“ sebou. V navrhovaném zařízení budou takto zapojeny celkem tři obvody.



Obr. 6.1: Zapojení měřicích vstupů pro obvod BQ76PL536A

Schéma zapojení integrovaného obvodu vychází z katalogového listu obvodu [18] a z ukázkového návrhu zapojení s tímto obvodem [19]. Na Obr. 6.1 je detail zapojení dvou měřicích vstupů tohoto obvodu. Svorka CIN0 je připojena na záporný pól prvního článku série, CIN1 je připojena na kladný pól téhož článku a zároveň na záporný pól druhého článku v sérii. Svorka CIN2 je připojena ke kladnému pólu druhého článku a zároveň k zápornému pólu třetího článku. Pro další články by byly analogicky použity další svorky a měřicí vstupy by byly zapojeny také stejně.

Cívka L3 a kondenzátor C14 tvoří vstupní EMI filtr pro omezení vstupu VF rušení. Tyto dvě součástky by měly být fyzicky umístěny co nejbliž sebe navzájem, a také co nejbliž vstupnímu konektoru (kam jsou přivedeny vodiče z baterie). Kondenzátor C16 a Zenerova dioda ZD9 tvoří ochranu analogových vstupů integrovaného obvodu při připojování k baterii (připojování se děje vždy pod napětím protože lithiové články jsou už z výroby nabité na napětí okolo 3,6 V).

Rezistor R53 je výkonový rezistor, na kterém se přeměňuje přebytečná energie v teplo během balancování. Tento rezistor je spínán z integrovaného obvodu přes tranzistor Q14. Součástky ZD11, R55 a R59 zajišťují ochranu hradla tranzistoru Q14 i výstupního pinu integrovaného obvodu. Rezistor R58 a kondenzátor C18 tvoří dolní propust, kterou je měřené napětí článku filtrováno. Podobně to je i s rezistorem R61 a kondenzátorem C20, dolní propust je však zapojena proti zemi. Svorka C1 je měřicí vstup do integrovaného obvodu, svorka B1 je výstup obvodu pro ovládání balancovacího tranzistoru Q14.

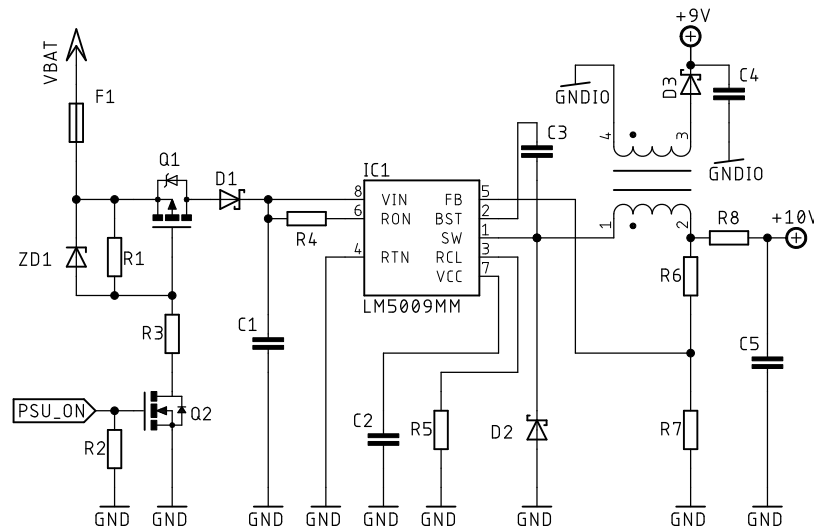
Funkce dalších součástek zapojení je analogická, patří však k dalšímu článku. Za povšimnutí stojí, že vstupní EMI filtr (L2 a C13) je zapojen proti společné zemi obvodu, stejně jako dolní propust tvořená součástkami R60 a C19. Oproti tomu zbylé součástky jsou připojeny diferencially – ke kladnému pólu dolního článku.

6.2 Napájecí zdroj

Navrhovaný systém BMS bude obsahovat celkem dva napájecí zdroje. Hlavní napájecí zdroj, který bude aktivní během normálního provozu zařízení a pomocný napájecí zdroj. V případě přechodu do režimu spánku bude hlavní zdroj odstaven a většina obvodů bude vypnuta. Aktivní zůstane pouze pomocný napájecí zdroj, který bude udržovat v chodu nejdůležitější části procesoru a obvody nutné pro detekci odběru proudu. V případě, že bude detekován odběr proudu z baterie, zapne se hlavní napájecí zdroj a zařízení přejde do normálního provozního režimu.

6.2.1 Hlavní napájecí zdroj

Jako hlavní napájecí zdroj bude použit snižující DC-DC měnič řízený jednoúčelovým obvodem LM5009 firmy Texas Instruments. Obvod má integrovanou všechnu potřebnou řídicí elektroniku i výkonový tranzistor. Obvod pracuje s proměnnou spínací frekvencí a je označován jako *Constant On-Time*. Výkonový tranzistor je sepnut na předem danou dobu, a pak je měřeno výstupní napětí zdroje. Jakmile výstupní napětí poklesne pod danou hodnotu, je výkonový tranzistor sepnut znovu, opět na stejnou dobu. Doba mezi sepnutími se mění podle zatížení zdroje a tím se mění i frekvence.



Obr. 6.2: Zapojení hlavního napájecího zdroje

Schéma zapojení hlavního napájecího zdroje je uvedeno na Obr. 6.2. Toto zapojení vychází z literatury [21] určené pro obvod LM5017, který je použitému obvodu LM5009 velmi podobný. Oproti originálnímu katalogovému zapojení obvodu LM5009 [20] je toto zapojení doplněno o další výstup, který je od hlavního výstupu galvanicky izolovaný.

Tranzistory Q1 a Q2 (společně s R1, R3, R3 a ZD1) připojují napětí baterie na vstup zdroje v případě, že je na výstupu procesoru PSU_ON logická 1. Kondenzátor C1 slouží k pokrytí proudových špiček odebíraných při spínání zdroje. Velikostí rezistoru R4 se nastavuje doba, na kterou je výkonový tranzistor měniče sepnut. Kondenzátor C2 slouží k filtraci napájecího napětí vnitřní elektroniky zdroje. Velikostí rezistoru R5 se nastavuje citlivost zabudované proudové ochrany. Dioda D2 je nulová dioda DC-DC měniče (výkonový tranzistor je integrovaný uvnitř, nulová dioda ne). Kondenzátor C3 je během doby vedení nulové diody nabit na napětí vnitřního zdroje integrovaného obvodu a během sepnutí výkonového tranzistoru je z něj

tento tranzistor napájen – jedná se o kondenzátor nábojové pumpy, tzv. bootstrap.

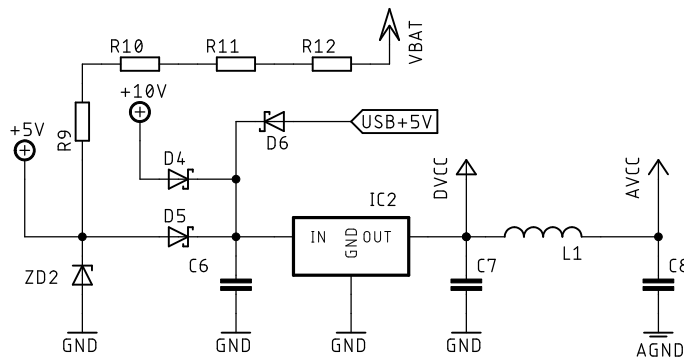
Rezistory R6 a R7 tvoří dělič, jehož dělicím poměrem se nastavuje velikost výstupního napětí. Střed tohoto děliče je veden do zpětné vazby integrovaného obvodu a výstup je řízen tak, aby na středu děliče bylo napětí 2,5 V. Výstupní filtr měniče je tvořen tlumivkou se dvěma vinutími a kondenzátorem C5. Rezistor R8 uměle zvyšuje sériový odpor výstupního kondenzátoru C5. Toto opatření je nutné z principu funkce integrovaného obvodu, integrovaný výstup porovnává výstupní napětí a potřebuje tedy určitou velikost zvlnění na výstupu. Druhé vinutí výstupní tlumivky tvoří galvanicky oddělenou větev napájecího zdroje. Dioda D3 slouží k usměrnění napětí a kondenzátor C4 k jeho vyhlazení.

Zdroj funguje jako kombinace běžného snižujícího měniče a blokujícího měniče s transformátorem. V době sepnutí výkonového tranzistoru je tlumivka připojena na rozdíl vstupního a výstupního napětí, její proud narůstá a zároveň je dobíjen kondenzátor C5. V době vypnutí výkonového tranzistoru se jádro tlumivky může demagnetizovat dvěma způsoby. První je, že se proud uzavře v primárním vinutí přes nulovou diodu D2 a dál se bude dobíjet kondenzátor C5. Druhý způsob je, že proud v primárním vinutí nepoteče a k demagnetizaci dojde přes sekundární vinutí diodou D3 a bude se dobíjet kondenzátor C4. Který způsob se uplatní, záleží na aktuálním zatížení hlavního a galvanicky odděleného výstupu. dobíjet se bude vždy kondenzátor, na kterém je nižší napětí. Podmínkou pro správnou funkci tohoto zapojení je vyšší odběr proudu z hlavního výstupu než z výstupu galvanicky odděleného.

6.2.2 Pomocný napájecí zdroj

Schéma zapojení pomocného napájecího je na Obr. 6.3. Samotný pomocný zdroj je tvořen Zenerovou diodou ZD2 a sériovými rezistory R9, R10, R11 a R12. Výstup tohoto „zdroje“ je veden přes diodu D5 do lineárního stabilizátoru napětí IC2, který napájí procesor. Sériové rezistory R9, R10, R11 a R12 musí být zvoleny tak, aby dodaly dostatečný proud uspanému procesoru a vlastní spotřebě lineárního stabilizátoru IC2 a napětí na Zenerově diodě ještě nezačalo klesat (diodou musí stále procházet nějaký minimální proud). Zároveň, proud Zenerovou diodou musí být malý, protože jenom zbytečně vybíjí baterii.

Přes diodu D4 je do lineárního stabilizátoru připojen vstup hlavního napájecího zdroje a přes diodu D6 napájení z USB portu. Díky tomu a správné volbě velikostí napětí je procesor napájen vždy ze správného napětí a jednotlivé zdroje se navzájem neovlivňují.



Obr. 6.3: Zapojení pomocného napájecího zdroje

6.3 Polovodičový spínač

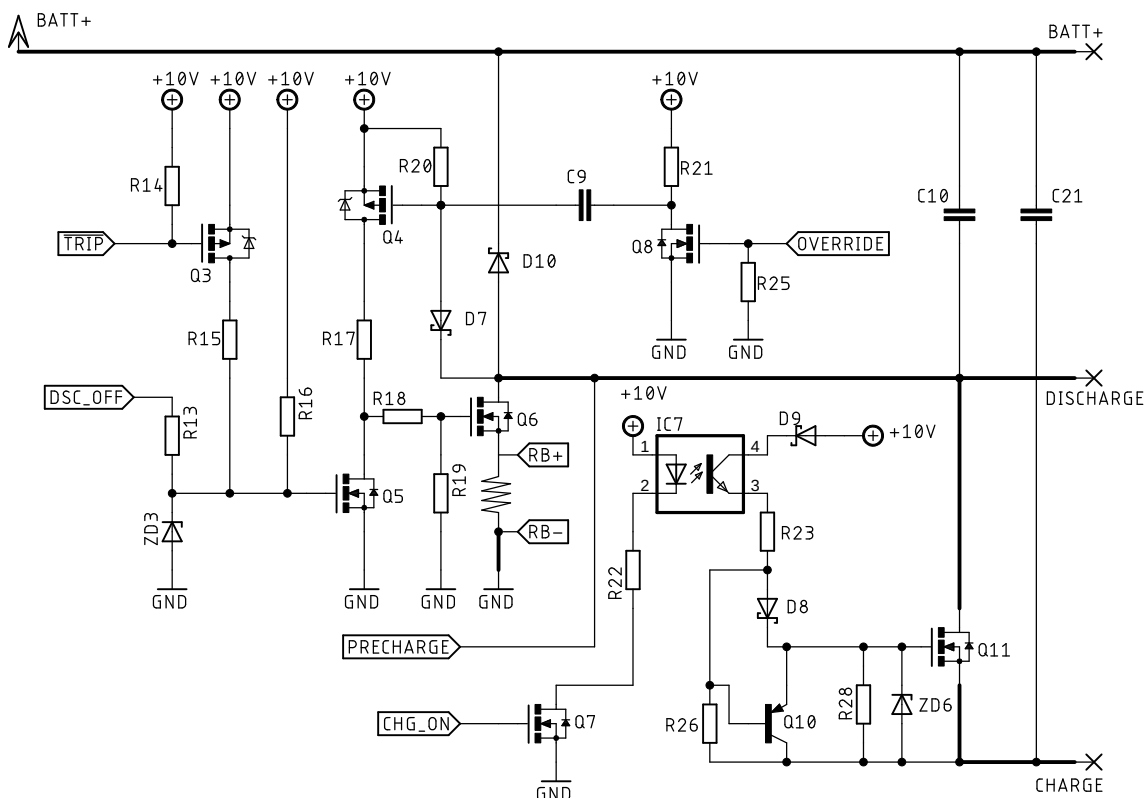
Polovodičový spínač je část navrhovaného systému BMS, která zajišťuje silové odpojení zátěže nebo nabíječky. Schéma zapojení je uvedeno na Obr. 6.4. Svorka BATT+ je společná pro připojení zátěže i nabíječky, svorka DISCHARGE je vybíjecí port a slouží pouze k připojení zátěže. Svorka CHARGE je nabíjecí port a slouží k připojení nabíječky.

6.3.1 Spínání vybíjecího portu

Tranzistor Q6 je výkonový tranzistor, který obstarává silové odpojení vybíjecího portu. Společně s tranzistorem Q4 tvoří klopný obvod. Pokud se jeden z tranzistorů otevře, otevře se i druhý tranzistor a tranzistory se navzájem udržují otevřené. Pokud se jeden z tranzistorů zavře, zavře se i druhý tranzistor a oba v zavřeném stavu zůstanou. Toto zapojení je použito proto, že se chová přesně tak, jak se od výstupu očekává – výstup se buď zapne a zůstane zapnutý a nebo se vypne a zůstane vypnutý, dokud není cíleně zapnut znovu.

Pro vypínání klopného obvodu je použit tranzistor Q5. Pokud je tento tranzistor sepnut, je hradlo výkonového tranzistoru Q6 zkratováno na zem přes rezistor R18. Tranzistor Q3 signál k vypnutí invertuje – pokud je signál $\overline{\text{TRIP}}$ logické 0, jedná se o povel k vypnutí výkonového tranzistoru. Tato logika je zavedena kvůli použití komparátorů s výstupem typu otevřený kolektor, které jsou použity jako rychlé analogové ochrany. Signál DSC_OFF je připojen přímo na pin procesoru a má dvě funkce – připojením logické 1 z procesoru je výkonový tranzistor vypnut. Pokud je pin procesoru přepnut na vstup, přítomnost logické 1 procesoru hlásí, že zapůsobila některá z ochrany.

Zapnutí klopného obvodu je možné dvěma způsoby. Prvním způsobem zapnutí je přivedení logické 1 z procesoru na signál OVERRIDE. Tím se sepnou tranzistor Q8



Obr. 6.4: Zapojení polovodičového spínače

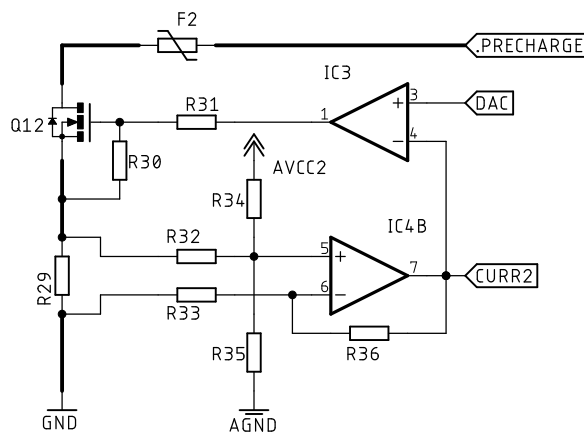
a toto sepnutí je přes kondenzátor C9 přeneseno i na hradlo tranzistoru Q4, který spíná výkonový tranzistor. Použitím kondenzátoru C9 je zajištěno, že povel k zapnutí není trvalý, ale po určité chvíli odezní. Pokud je vše v pořádku, k sepnutí klopného obvodu bude povel stačit. Pokud by během spínání vybavila některá z ochran (pokus o zapnutí do zkratu), klopný obvod nezůstane sepnutý. Použitím klopného obvodu a kondenzátoru je zamezeno periodickému vybavování ochrany.

Druhým způsobem sepnutí klopného obvodu je použití obvodu přednabíjení kapacitní zátěže – Obr. 6.5. Výstup tohoto obvodu je připojen přímo k vybíjecímu portu. Zapojení využívá vlastností klopného obvodu: pokud napětí na vybíjecím portu dostatečně poklesne, otevře se tranzistor Q4 a ten otevře výkonový tranzistor Q6. Pokles napětí je způsoben nabitím kondenzátoru C10, případně nabitím kondenzátorů v meziobvodu střídače, který je typicky připojen jako zátěž.

Dioda D10 slouží jako nulová dioda a po vypnutí výkonového tranzistoru přebírá proud parazitní indukčnosti výstupních vodičů, čímž chrání výkonový tranzistor před napětovým průrazem. Při vypnutí zátěže spolupracuje tranzistor Q4, dioda D10 a kondenzátor C10. Při vypnutí proudu nabíječky spolupracují tranzistor Q4, dioda D10 a kondenzátor C21.

6.3.2 Obvod přednabíjení kapacitní zátěže

Obvod přednabíjení kapacitní zátěže je znázorněn na Obr. 6.5. Vlastní proudový zdroj je tvořen tranzistorem Q12 a operačním zesilovačem IC3. Požadovaný proud je nastavován v procesoru pomocí DAC převodníku (signál DAC). Skutečný proud je měřen na bočníku R29 pomocí operačního zesilovače IC4 v diferenciálním zapojení. Rezistory R34 a R35 posouvají výstupní napětí zesilovače na hodnotu $\frac{AVCC2}{2}$, aby bylo možné měřit oba směry proudu. Pro funkci proudového zdroje to není nutné, ale měření je využito i pro další účely a je vedeno do procesoru (signál CURR2).



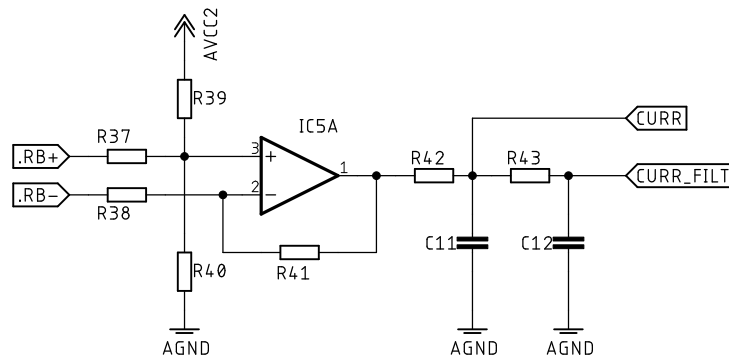
Obr. 6.5: Zapojení obvodu přednabíjení kapacitní zátěže

6.3.3 Spínání nabíjecího portu

Schéma zapojení spínání nabíjecího portu je uvedeno na Obr. 6.4. Nabíječka je připojována pomocí výkonových tranzistorů Q6 a Q11. Tranzistor Q6 je společný pro spínání nabíječky i zátěže, při nabíjení musí být sepnut (popsáno v kap. 6.3.1). Tranzistor Q11 má smysl spínat pouze v případě, že je připojena nabíječka a mezi svorkami BATT+ a CHARGE je napětí větší, než je aktuální napětí baterie. Potom je na svorce CHARGE záporné napětí vůči zemi (GND). Tranzistor Q11 tedy může být spínán ze zdroje napětí +10 V přes optočlen IC7. Dioda D9 chrání tranzistor optočlenu před napětím opačné polaroty v případě, že by nastal zkrat mezi svorkami CHARGE a BATT+. Tranzistor Q10 je zapojen jako sledovač a zajišťuje rychlé vypnutí tranzistoru Q11. Tranzistorem Q7 je spínán optočlen podle povelů procesoru a ochrany (viz kap. 6.5).

6.4 Měření proudu

V navrhovaném systému je potřeba měřit proud ze dvou důvodů: rychlá ochrana baterie proti zkratu a počítání prošlého náboje. První uvedený důvod vyžaduje rychlé měření, druhý vyžaduje co nejmenší statickou chybu (offset). Pro měření proudu je použito odporového bočnicku umístěného v drainu tranzistoru Q6 (viz Obr. 6.4). Signál z bočnicku (RB+, RB−) je veden na vstup operačního zesilovače v rozdílovém zapojení na Obr. 6.6.



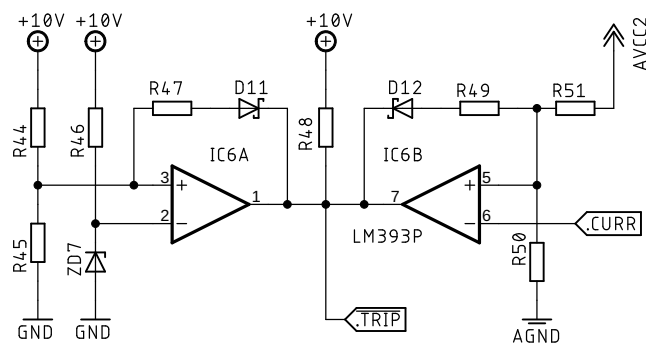
Obr. 6.6: Zapojení měření proudu

Toto zapojení je tvořeno operačním zesilovačem IC5A a rezistory R37, R38, R39 a R40. Za zesilovač jsou zařazeny dvě dolní propusti. První z nich (R42, C11) má malou časovou konstantu a její výstup první slouží jako vstup nadproudové ochrany. Druhá dolní propust (R43, C12) má řádově větší časovou konstantu a její výstup je veden do procesoru, kde je ze signálu počítán prošlý náboj.

Pokud je odebíraný proud malý, je možné pro zvýšení přesnosti výpočtu prošlého náboje použít i měření proudu v obvodu přednabíjení kapacitní zátěže (Obr. 6.5). Přítomnosti dvou, na sobě nezávislých, měření proudu je také možné využít ke kalibraci offsetů operačních zesilovačů. Kalibraci je možné provést za běhu se sepnutým vybíjecím portem, odebíraný proud ale nesmí být větší, než proud, který je schopný dodat obvod přednabíjení kapacitní zátěže (Obr. 6.5).

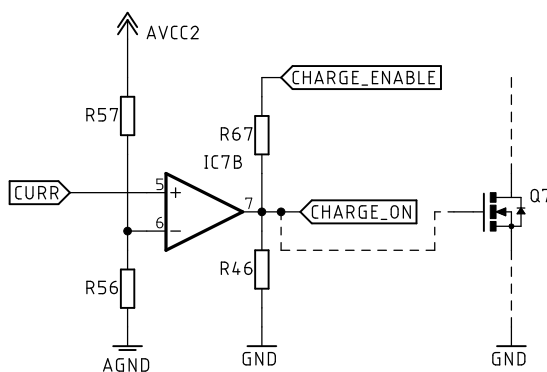
6.5 Analogové ochrany

Ochrana baterie proti zkratu vyžaduje velmi rychlou odezvu a je proto realizována analogově, pomocí komparátoru. Dále je pomocí komparátoru realizována ochrana proti poklesu napájecího napětí +10 V. Zde sice není přímo požadována rychlá reakce, ochrana ale musí být jednoduchá a spolehlivá.



Obr. 6.7: Zapojení analogových ochran

Zapojení nadproudové ochrany a ochrany proti poklesu napájecího napětí je uvedeno na Obr. 6.7. Každá z ochran je tvořena komparátorem s hysterezí. komparátory mají výstup typu otevřený kolektor – výstupy lze řadit paralelně, vybavení kterékoli z ochran znamená chybu a okamžité odpojení zátěže.



Obr. 6.8: Zapojení ochrany nabíjecího portu

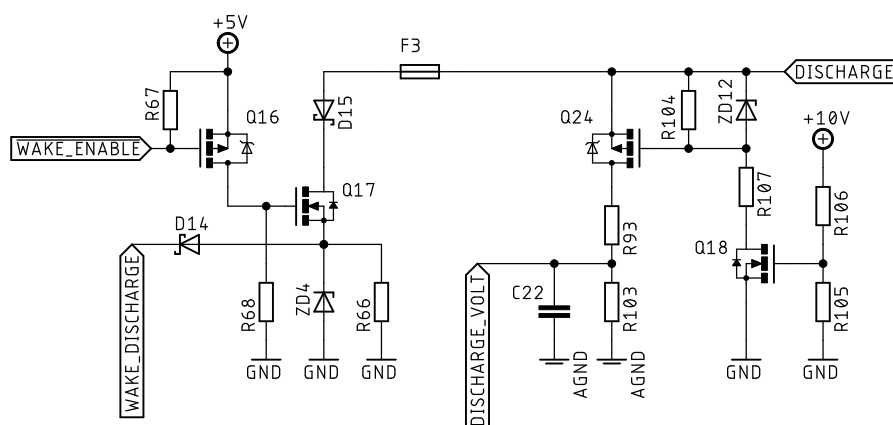
Nadproudová ochrana z Obr. 6.7 reaguje pouze na překročení proudu v jednom směru – pokud zátěž proud z baterie odebírá. Při překročení proudu v opačném směru (při nabíjení) tato ochrana nereaguje.

Ochrana proti nadproudu při nabíjení je uvedena na Obr. 6.8. Obvod IC7B je komparátor s výstupem typu otevřený kolektor. Signál CHARGE_ENABLE je veden z pinu procesoru a ovládá spínání nabíjecího portu. Pokud je pin procesoru v logické 0, je tranzistor Q7 vypnutý a tím je vypnutý i celý nabíjecí port. V případě, že je potřeba nabíjecí port sepnout, pin procesoru se přepne do režimu vstupu s pull-up rezistorem (pull-up rezistor je uvnitř procesoru, nejedná se o rezistor R67 na Obr. 6.8). Pull-up rezistor procesoru stačí na sepnutí tranzistoru Q7 a zároveň

umožňuje měření výstupního napětí. Pokud nadproudová ochrana (tvořená obvodem IC7B) zaregistruje nadproud, ihned nabíjecí port vypne. Díky použití pull-up rezistoru se informace o aktivaci ochrany zároveň dostane do procesoru, který v prvním kroku odpojí pull-up rezistor, aby nedocházelo k cyklickému vybavování ochrany.

6.6 Obvod detekce připojení zátěže

Navrhovaný systém bude možno uspat a tím snížit jeho spotřebu. Většina obvodů (včetně ochrany) bude neaktivních a výstup proto nesmí být sepnut. Celý systém je probuzen při připojení zátěže. Obvod, detekující připojení zátěže je zobrazen na Obr. 6.9. pokud je probuzení připojením zátěže povoleno, z procesoru je signálem $\overline{\text{WAKE_ENABLE}}$ sepnut tranzistor Q16, kterým je sepnut tranzistor Q17. Vybíjecí port je připojen k zápornému pólu baterie přes rezistor R66. Jakmile je připojena zátěž, průchodem proudu přes rezistor R66 se na něm objeví napětí, které je vedeno do procesoru a probudí ho. Velikost proudu zátěže, který už procesor probudí je možné upravit změnou velikosti odporu R66.



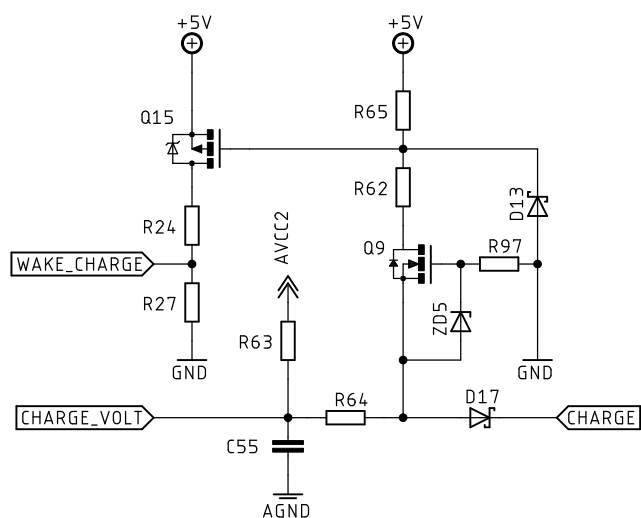
Obr. 6.9: Zapojení obvodu detekce připojení zátěže

Rezistory R93 a R103 tvoří dělič, přes který je měřeno napětí na vybíjecím portu. Tento dělič je připojen k vybíjecímu portu jenom v případě, že je zapnutý hlavní napájecí zdroj +10 V. Pro připojení děliče slouží tranzistory Q18 a Q24.

6.7 Obvod detekce připojení nabíječky

Ze stavu spánku může být celý systém probuzen nejen připojením zátěže, ale i připojením nabíječky. Pro detekci připojení nabíječky slouží obvod na Obr. 6.10. Pod-

mínkou pro detekci připojení nabíječky je, že napětí nabíječky je větší, než napětí baterie. Protože nabíječka je připojena přímo ke kladnému pólu baterie a k nabíjecímu portu (signál CHARGE), je napětí nabíjecího portu vůči zemi záporné. Na hradlu tranzistoru Q9 se objeví kladné napětí, které tento tranzistor otevře. Tím se otevírá tranzistor Q15, který přivede na pin procesoru napětí přes dělič tvořený rezistory R24 a R27. Rezistory R63 a R64 slouží k úpravě napětí na nabíjecím portu pro měření pomocí procesoru.



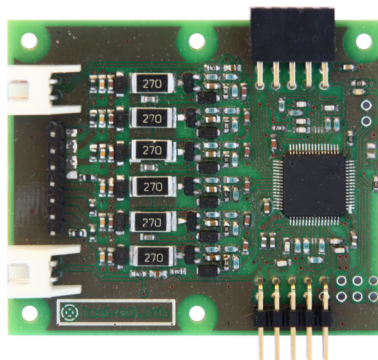
Obr. 6.10: Zapojení obvodu detekce připojení nabíječky

7 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

Podle schémat popsaných v předchozí kapitole byly pro systém BMS navrženy desky plošných spojů. Celý systém je rozdělen na tři části. První částí jsou desky balancéru, druhou částí je deska procesoru, třetí částí je deska polovodičového spínače. Pro návrh desek plošných spojů byl použit software Eagle, jehož používání je pro studenty zdarma.

7.1 Balancér

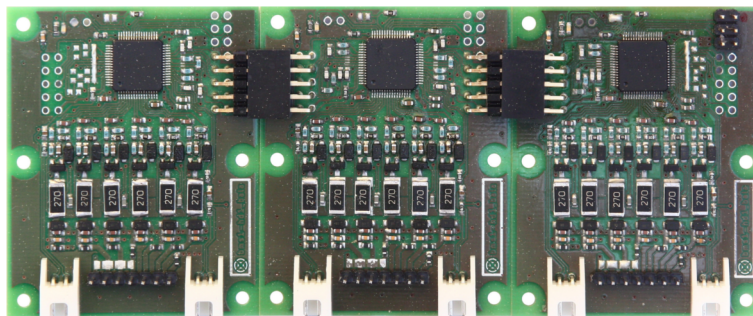
Pro balancér byla zvolena modulární koncepce. Na každých šest článků baterie připadá jeden obvod BQ76PL536A, a každý má svojí vlastní desku plošného spoje. Na deskách jsou umístěny konektory, které umožňují spojovat víc desek k sobě a přizpůsobit se tak danému baterii. Každý z modulů má rozměry 60 mm × 50 mm, deska je dvouvrstvá a je pouze jednostranně osazená. Druhá, neosazená, strana umožňuje montáž balancéru na chladicí plech přes izolační podložku. Tím je možné zlepšit odvod tepla a zvýšit balancovací proud. Jedna z dílčích desek balancéru je na Obr. 7.1, kompletní sestava balancéru je na Obr. 7.2.



Obr. 7.1: Balancér – jeden modul

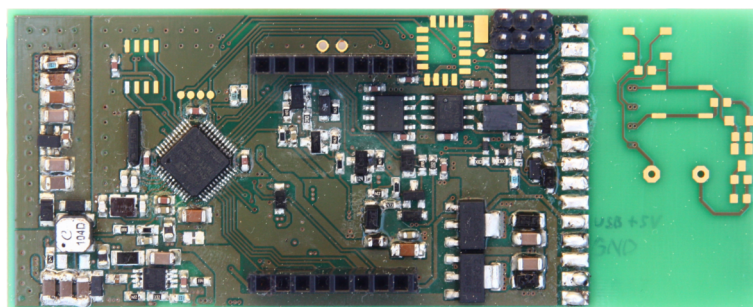
7.2 Deska procesoru

Další částí systému je deska procesoru. Kromě samotného procesoru jsou zde umístěny obvody uživatelského rozhraní – vstup pro tlačítko, výstup na RGB led a obvody komunikace (galvanické oddělení pro CAN a sériový port, budič pro CAN). Dále je zde umístěn napájecí zdroj, obvody detekce připojení zátěže nebo nabíječky a obvody analogových ochran.



Obr. 7.2: Balancér – celek sestavený ze tří modulů

Deska má rozměry 100 mm × 40 mm, je čtyřvrstvá a je oboustranně osazená. Deska procesoru je pomocí osmipinových řadových konektorů propojena s deskou polovodičového spínače, se kterou tvoří jeden celek. Pohled na vrchní stranu procesorové desky je na Obr. 7.3. Pocínované plošky v pravé části desky slouží k připojení signálových vodičů (USB, CAN, výstupy na stykače ...). Část vpravo od těchto pájecích plošek je určena k pokusnému osazení RGB led a tlačítka. V produkční verzi tato část vůbec nebude, tlačítko a RGB led budou vyvedeny na kabelu ven z baterie, pokud to bude potřeba.



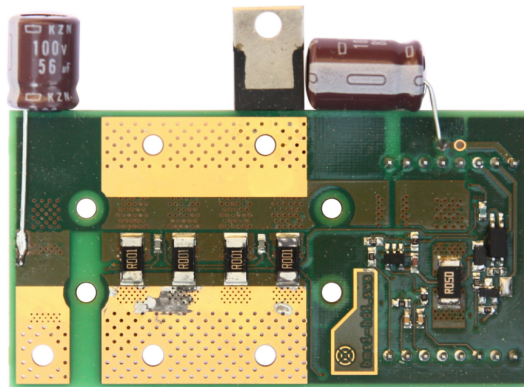
Obr. 7.3: Deska procesoru

7.3 Deska polovodičového spínače

Poslední částí systému je deska polovodičového spínače, pohled na její vrchní stranu je na Obr. 7.4. Na desce jsou umístěny výkonové tranzistory pro spínání nabíjecího a vybíjecího portu (osazené ze spodní strany), výkonové rezistory pro měření proudu společně s operačním zesilovačem pro zesílení měřeného signálu a obvod přednabíjení kapacitní zátěže. Deska má rozměry 75 mm × 40 mm, je také čtyřvrstvá a oboustranně osazená. Jako proudovodná dráha pro proud z baterie slouží hlavně vnitřní

dvě vrstvy. Pro snížení odporu může být deska vyrobena s vnitřními vrstvami o síle mědi až 105 μm .

Odkrytými plochami mědi bude deska dosedat na chladič, který bude zároveň sloužit jako svorkovnice pro připojení silových kabelů. Ze spodní části desky jsou osazeny protikusy řadových konektorů, ke kterým je připojena deska procesoru. Dioda v pouzdru TO220 a elektrolytické kondenzátory jsou zde umístěny jenom provizorně a během dalšího vývoje budou umístěny na vhodnější místo.



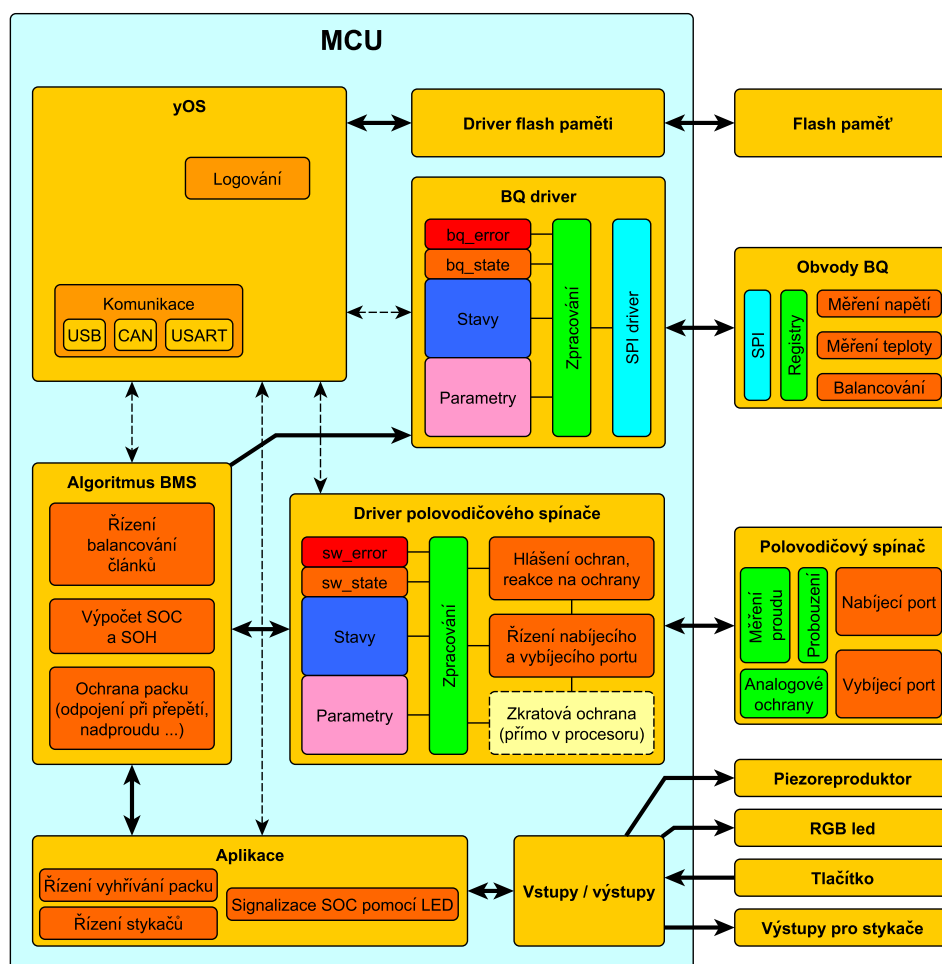
Obr. 7.4: Deska polovodičového spínače

8 ŘÍZENÍ BMS

Pro řízení celé BMS je použit procesor firmy ST Microelectronics STM32F303. Protože je tento procesor používán v dalších produktech firmy siliXcon, bylo možné použít části programu, které již existují a jsou odladěné. To výrazně urychlilo a zjednodušilo vývoj celého systému BMS. Použití částí již hotového systému v budoucnu také zjednoduší výrobu a uživatelskou podporu. Systém například umožňuje aktualizace SW přes internet a nebo vedení databáze všech vyrobených zařízení.

8.1 Struktura SW a funkce jednotlivých bloků

Struktura SW pro řízení systému BMS byla převzata z jiných, již existujících, zařízení firmy siliXcon. Struktura je uvedena na Obr. 8.1. Některé bloky byly převzaty a modifikovány, další musely být vytvořeny úplně nové. V následujících částech této kapitoly jsou jednotlivé bloky stručně popsány.



Obr. 8.1: Blokové schéma SW pro řízení systému BMS

8.1.1 yOS

Operační systém yOS byl převzat z jiných zařízení firmy siliXcon. Původně byl určen pro řízení třífázových střídačů, ale je možné ho bez větších změn použít i v jiných zařízeních. Jeho hlavním úkolem je zajistit běh dalších bloků SW, což se nejčastěji děje periodickým voláním odpovídajících funkcí.

Další důležitou funkcí je správa stavů a parametrů systému a komunikace s uživatelem. Uživatel může změnou parametrů nastavovat chování celého systému (například změna počtu článků, změna maximálních a minimálních povolených napětí ...). Uživatel může rovněž číst stavy systému (aktuální napětí baterie, odebíraný proud ...). Stavy a parametry mohou být rovněž použity ke komunikaci s dalšími zařízeními.

8.1.2 BQ driver

Tento blok slouží k ovládání balancéru. Jeho úkolem je navázat komunikaci s balancérem a zprostředkovat přenos informací z balancéru k dalším blokům SW a zpět. Dalším úkolem tohoto bloku je detekovat různé chybové stavy balancéru (balancér nekomunikuje, snaha o nastavení nesprávného počtu článků ...). Chybové stavy jsou hlášeny do dalších bloků ke zpracování, některé z nich se ovladač BQ pokouší sám opravit. Posledním úkolem je chránit samotný balancér před poškozením. Na každém modulu balancéru je několik teplotních čidel. V případě, že teplota čidla přesáhne určitou hodnotu, ovladač balancéru deaktivuje balancování a nespustí ho, dokud teplota neklesne a to i pokud logika BMS dává k balancování pokyn.

Během inicializace tohoto bloku jsou nalezeny všechny připojené moduly balancéru, jsou jim přiděleny adresy a je zkontrolováno, jestli počet nalezených modulů odpovídá nastavenému počtu článků baterie. Následně jsou nastaveny limity pro přepětí, podpětí a maximální teplotu článků. Překročení těchto hodnot je zaznamenáno přímo balancérem a je hlášeno zpět do procesoru.

Za běhu programu je ovladačem průběžně kontrolována funkčnost komunikace a hlášení limitních stavů (přepětí, podpětí a nadměrná teplota). Dále jsou periodicky vyčítána a zpracována napětí jednotlivých článků a údaje z teplotních čidel. V případě pokynu od logiky BMS je ovládáno balancování článků.

8.1.3 Driver polovodičového spínače

Úkolem tohoto bloku je ovládání polovodičového spínače a souvisejících obvodů. Tento blok dává přímo pokyny k sepnutí či rozepnutí spínače, měří a proud a napětí, které dále zpracovává a předává logice BMS. Blok rovněž shromažďuje a zpracovává hlášení o reakci zkratové ochrany a hlášení o připojení nabíječky či zátěže.

Součástí tohoto bloku jsou rovněž programová přerušení, ve kterých procesor reaguje na krizové situace jako je zkrat. Ten je sice vypínán pomocí analogových ochran, od procesoru je ale přesto vyžadována rychlá reakce, aby v určitých situacích nedocházelo k opětovnému sepnutí spínače při poklesu proudu. V budoucnu bude zkratová ochrana realizována přímo pomocí periférií v procesoru, takže tento blok bude rovněž zodpovědný za správné nastavení a funkci této ochrany.

8.1.4 Algoritmus BMS

Tento blok je nejdůležitějším blokem celého SW, protože je zde implementována vlastní funkcionality BMS – ochrana baterie a její monitorování. Princip funkce bloku je podrobně popsán v kapitole 8.2. Tento blok může být dále rozdělen na tři dílčí bloky:

- Ochrana baterie – odpojení výstupu při překročení limitních hodnot, rozhodnutí o ukončení nabíjení či vybíjení, rozhodnutí o přechodu baterie do chybového stavu a případné zotavení z tohoto stavu.
- Balancování článků – tento blok úzce spolupracuje s ochranou a řízením celé baterie a jeho úkolem je vyhodnocovat, které články je nutno balancovat, a jak dlouho.
- Výpočet SOC a SOH – proces, který běží na pozadí a z měřených hodnot napětí a proudu odhaduje aktuální stav nabití baterie a její celkovou kondici.

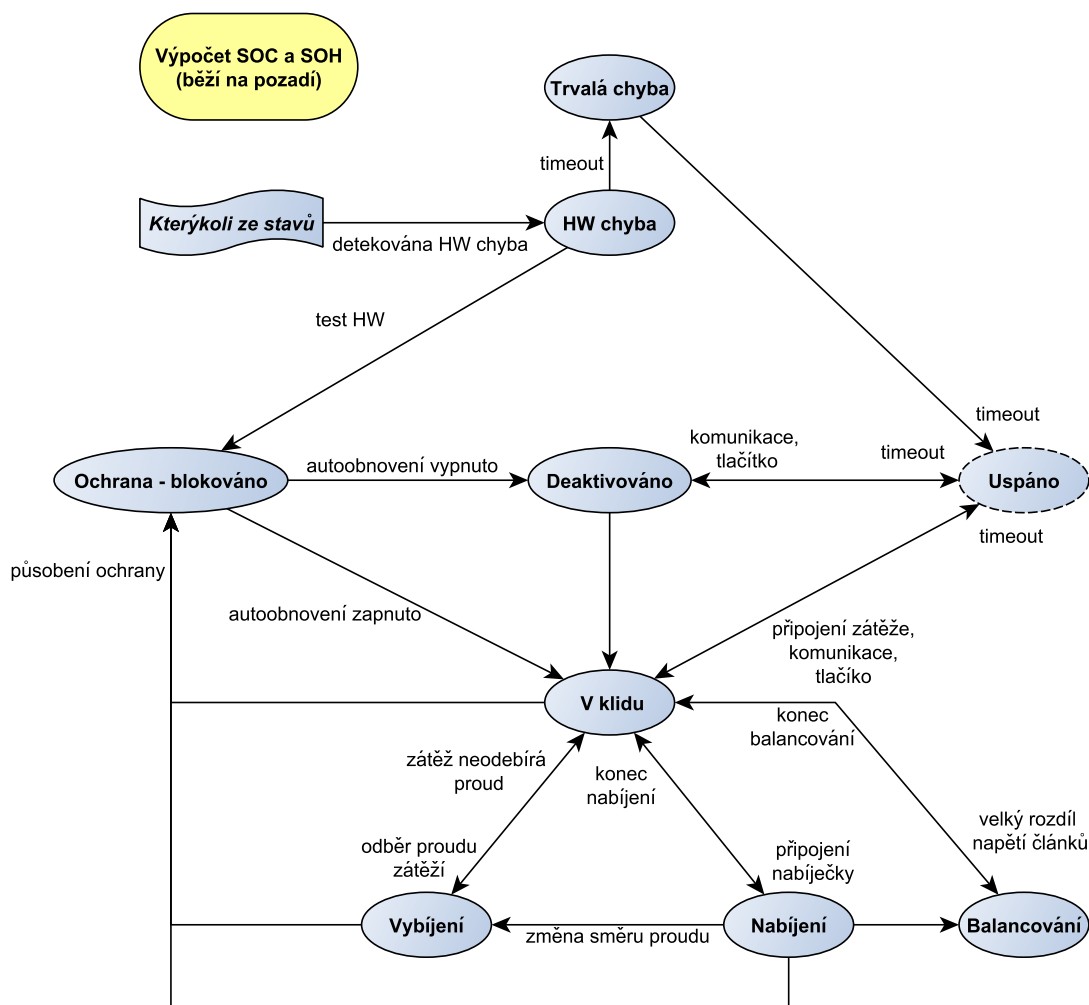
8.1.5 Aplikace

Aplikace je blok SW, který za běžného provozu (tedy ne během nastavování a jiných servisních procedur) interaguje s uživatelem a případně plní různé jeho specifické požadavky. Jsou zde implementovány funkce, které přímo nesouvisí s péčí o baterii a nepatří do bloku logiky BMS. Například sem spadá řízení pomocných výstupů pro stykače, signalizace stavu nabití baterie pomocí RGB LED diody či možnost odpojit silový výstup baterie na požadavek uživatele (například během přepravy baterie). Další volitelnou funkcí tohoto bloku je řízení vyhřívání baterie pro její provoz v zimním období.

8.2 Popis algoritmu BMS

Algoritmus BMS je nejdůležitější částí řízení celého systému. Zde se nachází soubor pravidel, která zabezpečují ochranu celé baterie a její monitorování. Algoritmus BMS má podobu stavového automatu, jehož diagram je uveden na Obr. 8.2. Jedná se o skupinu stavů, kdy každý stav definuje chování systému BMS. Na základě vnějších

událostí (pokyny uživatele, připojení zátěže, velikosti napětí na článcích ...) dochází k přechodu mezi stavy podle předem daných pravidel. V několika následujících podkapitolách jsou jednotlivé stavy a přechody mezi nimi popsány.



Obr. 8.2: Stavový diagram algoritmu BMS

HW chyba

V případě, že procesor detekoval závadu na samotném systému BMS, systém přechází do stavu HW chyby. Typickým důvodem pro přechod do této chyby je nekomunikující modul balancéru, detekce odpojeného vodiče pro měření napětí na článcích, chybně nastavený počet článků, nesmyslné údaje některého čidla teploty nebo nesrovnalosti mezi měřeným napětím na portech BMS a jejich stavem (na sepnutém tranzistoru není nulové napětí).

V tomto stavu je nabíjecí i vybíjecí port BMS rozpojen, balancování je neaktivní a předpokládá se, že měřené údaje jsou nesprávné. Zdroj chyby je zaznamenán a BMS tento zdroj průběžně kontroluje, jestli už chyba nepominula. Pokud se tak během určitého počtu pokusů nestane, je chyba považována za trvalou a BMS přechází do stavu trvalé chyby.

V případě, že chybová podmínka pomine (například se podaří opět navázat komunikaci s balancérem), BMS přechází do stavu *ochrana – blokováno*, ze kterého může přejít do dalších funkčních stavů.

Trvalá chyba

V případě, že se ani po určitém počtu pokusů nepodařilo HW chybu odstranit, BMS přechází do stavu trvalé chyby. V tomto stavu se BMS dál už nesnaží chybu odstranit a vyžaduje servisní zásah. Po určitém čase přejde do stavu *uspáno*, aby se předešlo případnému vybití baterie vlastní spotřebou BMS.

Ochrana – blokováno

Do tohoto stavu se BMS dostane v případě zapůsobení některé z ochran (například vypnutí zkratu, přepětí na některém z článků, vysoká teplota ...). Nabíjecí i vybíjecí port je rozpojen, balancování zakázáno a BMS kontroluje, jestli stále trvá příčina, která vedla k přechodu do tohoto stavu. Po odeznění této příčiny a uplynutí bezpečnostního intervalu přechází BMS do stavu *deaktivováno* nebo do stavu *v klidu* v závislosti na tom, jestli je povoleno autoobnovení nebo ne.

V případě, že je autoobnovení zapnuto přechází BMS do stavu *v klidu* a může se stát, že uživatel vybavení některé z ochran ani nezaregistruje. V případě, že autoobnovení zapnuto není přechází BMS do stavu *deaktivováno* a pro opětovné připojení zátěže vyžaduje reakci uživatele. Tím je uživatel spolehlivě upozorněn na vybavení některé z ochran a může předejít případným dalším problémům.

Deaktivováno

V tomto stavu je nabíjecí i vybíjecí port rozpojen a balancování vypnuto. Není detekována žádná chyba ani působení některé z ochran a BMS je připravena k připojení zátěže či nabíječky, čeká však na pokyn uživatele. Pokud je BMS v tomto stavu delší dobu beze změny, automaticky přechází do stavu *uspáno* pro snížení spotřeby.

Tento stav je určen k tomu, aby ho uživatel používal k cílenému odpojení výstupů baterie v okamžicích, kdy je přítomnost napětí na nich nežádoucí, například během přepravy baterie.

Uspáno

Tento stav je určen pro snížení spotřeby elektrické energie z baterie v době, kdy z něj není zátěží odebírán žádný proud. V tomto stavu je většina obvodu deaktivována, je vypnut hlavní napájecí zdroj a procesor je uveden do režimu nízké spotřeby. V intervalech několika desítek minut až jednotek hodin dochází k aktivaci měřicích obvodů, provedení měření a opětovnému uspání.

K přechodu ze stavu *uspáno* do některého z aktivních stavů dojde detekcí připojené zátěže či nabíječky, na pokyn uživatele nebo pokud je detekováno připojení komunikačního rozhraní USB.

V klidu

V tomto stavu je baterie připravena dodávat ihned proud do zátěže, vybíjecí port BMS je sepnutý, nabíjecí je rozpojený. Je měřen zejména proud odebíraný z baterie, jsou monitorovány a vyhodnocovány všechny další sledované veličiny. Pokud je detekován odběr proudu zátěží, BMS přechází do stavu *vybíjení*. V případě, že je detekováno připojení nabíječky, je provedena kontrola jejího napětí a kontrola stavu nabití baterie, případně je sepnut nabíjecí port a BMS přechází do stavu *nabíjení*.

Pokud je ve stavu *v klidu* detekován rozdíl napětí na jednotlivých článcích větší než nastavená mez, přechází BMS do stavu *balancování*. V případě, že není po určitou dobu detekován ani jeden z výše popsanych případů, BMS přechází do stavu *uspáno*.

Vybíjení

Pokud zátěž odebírá proud, BMS se nachází ve stavu *vybíjení*. Vybíjecí port je sepnutý, sepnutí nabíjecího portu a balancování je zakázáno. Jsou měřeny a vyhodnocovány všechny sledované veličiny. V případě poklesu odebíraného proudu pod nastavenou mez dochází k přechodu zpět do stavu *v klidu*. Přechody do jiných stavů jsou zakázány, výjimku tvoří stavy *ochrana – blokováno* a *HW chyba*. Podmínky pro přechod do těchto stavů jsou kontrolovány ve všech ostatních stavech a přechod do těchto stavů má prioritu před všemi ostatními stavy, protože se jedná o bezpečnostní funkci.

Nabíjení

Jestliže je ve stavu *v klidu* detekováno připojení nabíječky a je vyhodnoceno, že je možné baterii nabíjet, BMS přechází do stavu *nabíjení*. V tomto stavu je sepnut nabíjecí a vybíjecí port a je povoleno balancování. Jsou měřeny a vyhodnocovány všechny sledované veličiny. Pokud nabíjecí proud poklesne pod stanovenou mez, je nabíjení ukončeno. Pokud je detekován velký rozdíl napětí mezi jednotlivými

články baterie, dochází k přechodu do stavu *balancování*. Balancování může probíhat samostatně a nebo souběžně s nabíjením.

Pokud je detekována změna směru proudu, může BMS přejít přímo ze stavu *nabíjení* do stavu *vybíjení*. Povolení tohoto přechodu by mohlo být vhodné pro některé případy použití, ale znamená určité bezpečnostní riziko.

V případě detekce chyby, případně zapůsobení některé z ochran, přechází BMS prioritně do stavu *ochrana – blokováno* či *HW chyba*.

Balancování

Do tohoto stavu přechází BMS ze stavů *v klidu* či *nabíjení* v případě, že je detekován rozdíl napětí mezi jednotlivými články vyšší, než nastavená mez. Články s vyšším napětím jsou pomocí balancéru přemostěny rezistorem a vybíjeny, dokud není jejich napětí stejné, jako napětí ostatních článků. Jakmile je tohoto dosaženo, BMS přechází zpět do stavu *nabíjení* či *v klidu*.

9 OŽIVENÍ A MĚŘENÍ

V této kapitole je popsán postup ožívání celého zařízení, ověření některých základních funkcionalit a řešení problémů, které se během ožívání objevily. Protože je velká část obvodů BMS přímo vázána na procesor, celý postup ožívání probíhal paralelně s vývojem programu pro procesor.

9.1 Oživení napájecích zdrojů

Jako úplně první byly oživeny a otestovány napájecí zdroje. Na desku plošných spojů byly osazeny pouze součástky, které bezprostředně se zdroji souvisely – spínaný zdroj, lineární stabilizátory napětí a pomocný „zdroj“ pro napájení zařízení v režimu spánku (Zenerova dioda v sérii s rezistorem).

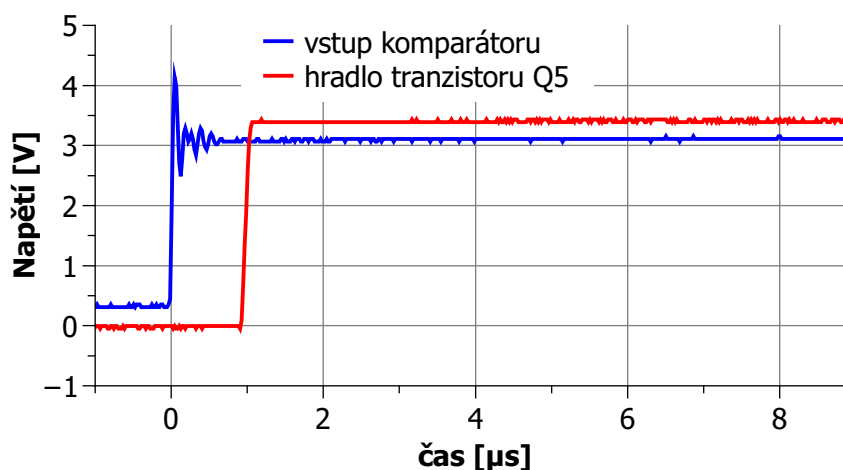
Jako první byl zapnut hlavní napájecí zdroj, zkontrolováno napětí na jeho výstupech a zdroj byl pokusně zatížen několika rezistory, aby byla ověřena jeho schopnost dodat požadovaný proud. Výstupní napětí hlavní větve je 10,75 V a lze odebírat proud 180 mA, vedlejší větev má výstupní napětí přibližně 10 V (napětí mírně kolísá podle zatížení jednotlivých větví) a lze odebírat proud přibližně 100 mA aniž by došlo k výraznějšímu poklesu napětí. Tímto bylo ověřeno, že hlavní napájecí zdroj funguje, má parametry, pro které byl navržený a bude správně napájet všechny ostatní obvody.

Podobně jako hlavní napájecí zdroj byly otestovány i lineární stabilizátory napětí pro procesor a další obvody. Výrobce u stabilizátorů udává, že je jejich výstup odolný vůči zkratu, tato vlastnost byla také testována a ukázalo se, že výstupy skutečně odolné proti zkratu jsou.

Jako poslední byl oživen a nastaven pomocný zdroj napájecího napětí tvořený Zenerovou diodou s předřadným rezistorem. Proud Zenerovou diodou byl nastaven na 200 μ A při minimálním napětí baterie. Při zapnutí pomocného zdroje se ukázalo, že jeho proud není dostatečný pro zapnutí stabilizátoru, který má napájet procesor v režimu spánku. Pokud byl tento stabilizátor předtím napájen z hlavního zdroje a hlavní zdroj byl následně vypnut, „zdroj“ ze Zenerovy diody byl schopný dodat dostatečný proud na to, aby udržel tento stabilizátor v provozu s výstupem naprázdno i s odběrem 100 μ A z výstupu stabilizátoru. Pomocný napájecí „zdroj“ bude stačit na to, aby udržel procesor napájený v režimu spánku. Stabilizátor z pomocného zdroje startovat nemusí, startovat bude při zapnutí hlavního zdroje, případně připojením napájení z USB. Poté už bude BMS stále zapnutá nebo v režimu spánku.

9.2 Oživení a testování analogových ochran

Dalším krokem v oživování celého zařízení bylo osazení analogových ochran a ověření jejich správné funkce. Po odstranění drobné chyby v zapojení začaly všechny ochrany správně fungovat. Na Obr. 9.1 je uveden osciloskopický záznam reakce zkratové ochrany na simulovaný zkrat. Modrý průběh je vstup ochrany, červený výstup je napětí na hradle tranzistoru Q5 (viz Obr. 6.4). Tento tranzistor již přímo vypíná výkonové tranzistory. Z osciloskopického záznamu je patrné, že reakční doba zkratové ochrany je přibližně 1 μ s.



Obr. 9.1: Časový průběh reakce zkratové ochrany na simulovaný zkrat

9.3 Oživení balancéru

Oživování balancéru probíhalo postupně s tvorbou SW ovladače pro balancér. Postupně byly implementovány další funkce do ovladače a rovnou byla zkoušena reakce balancéru na tyto funkce. Ukázalo se, že neocenitelnou pomůckou při programování komunikace s balancérem jsou LED diody umístěné na balancéru, na každém modulu je osazena jedna dioda. Dioda je ovládána zápisem do jednoho z ovládacích registru obvodu BQ76PL536A. Pomocí příkazů z procesoru bylo možné diodami blikat a tím testovat, jestli moduly balancéru správně komunikují.

Při oživování balancéru se objevily dva hardwarové problémy. První z nich bylo zaměnění dvou vodičů ve sběrnici SPI. Druhým problémem bylo zdánlivé rušení sběrnice, kdy komunikace fungovala někdy jenom částečně, jindy vůbec a to zdánlivě bez jakékoli vnější příčiny. Nakonec se ukázalo, že problém byl ve výstupních úrovních signálů. Obvod BQ76PL536A používá 5 V úroveň na sběrnici SPI, procesor STM32F303 používá úroveň 3,3 V. Přestože jsou piny procesoru 5 V tolerantní,

výstupní úrovně balancéru zarušily celou periferii procesoru obsluhující SPI. Chyba byla odhalena díky použití jiného procesoru (Atmel 328P), který může být napájen napětími 3,3 V i 5 V. Pokud byl tento procesor napájen napětím 3,3 V, komunikace s balancérem nefungovala úplně stejně jako na procesoru STM32F303. Pokud bylo použito napájecí napětí 5 V, komunikace začala fungovat bez problémů.

Aby mohl být použit procesor STM32F303, byl do signálu sběrnice SPI vřazen odporový dělič, který snížil úroveň napětí z 5 V výstupu obvodu BQ76PL536A na 3,3 V. Z hlediska procesoru je tedy celá sběrnice na napětí 3,3 V. Rozhodovací úrovně na straně balancéru jsou dostatečně nízko, takže i signál 3,3 V je balancérem vyhodnocen jako logická 1.

9.4 Oživení polovodičového spínače a měřicích obvodů

Jako poslední ze všech obvodů byl oživen polovodičový spínač a s ním související obvody měření napětí a proudu. U polovodičového spínače bylo testováno, jestli je povely z procesoru skutečně připojován a odpojován nabíjecí a vybíjecí port. Dále byl oživen obvod přednabíjení kapacitní zátěže. Tento obvod je tvořen tranzistorem a operačním zesilovačem (viz Obr. 6.5) a funguje jako zdroj konstantního proudu. Bylo kontrolováno, jestli nastavený proud zdroje odpovídá skutečně proudu procházejícímu.

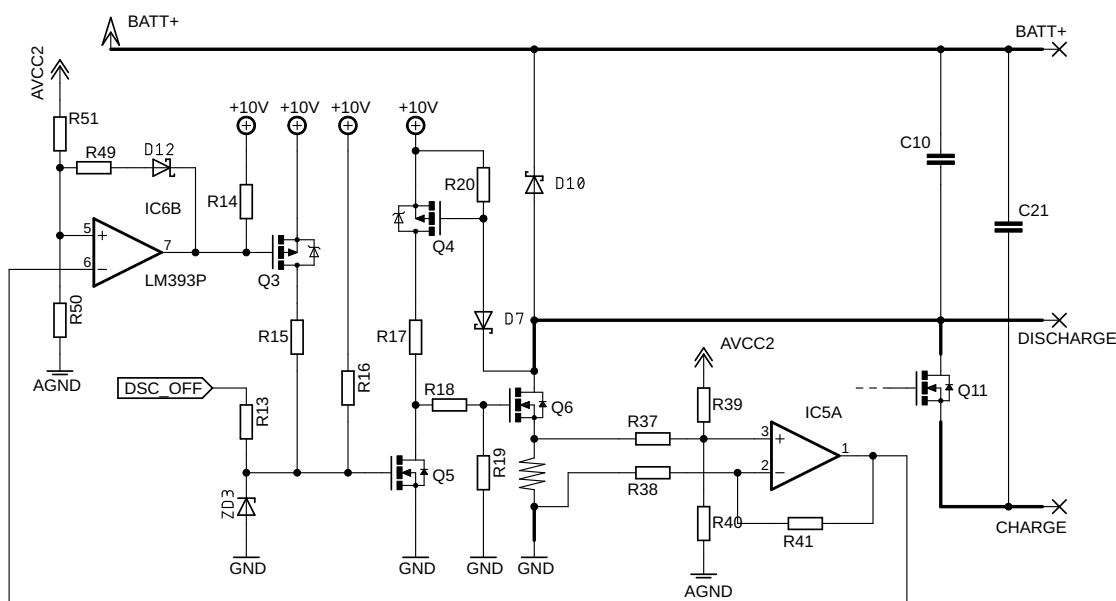
Oživení měřicích obvodů probíhalo souběžně s vývojem programu pro procesor. Samotné měřicí obvody jsou relativně jednoduché (odporové děliče, operační zesilovače v rozdílovém zapojení), pro jejich správnou funkci však bylo nutné správně nastavit A/D převodníky v procesoru. Po jejich nastavení byla provedena kontrola, zda hodnoty měřené procesorem odpovídají skutečným hodnotám.

Napětí měřená procesorem odpovídají skutečným napětím přesně. U měření proudu se objevila chyba offsetu, která je pravděpodobně způsobena vstupním offsetem použitého operačního zesilovače a nejspíš k této chybě přispívá i použití běžných rezistorů s tolerancí 1 % namísto rezistorů precizních s tolerancí 0,1 %. Během dalšího vývoje bude zvolen a otestován vhodnější operační zesilovač.

9.5 Testování zkratové ochrany

Jednou z nejdůležitějších funkcí navrhovaného systému BMS je ochrana baterie proti zkratu na výstupu. Po oživení celého zařízení následovalo testování této ochrany. Celkové zjednodušené schéma je uvedeno na Obr. 9.2. Nejdůležitějšími obvody, kterých se reakce na zkrat týká jsou:

- Polovodičový spínač – na Obr. 9.2 se jedná o tranzistor Q6, který zkratový proud vypíná.
- Měření proudu – proud je měřen na bočníku v drainu tranzistoru Q6, signál je zesilován operačním zesilovačem IC5A v rozdílovém zapojení.
- Zkratová ochrana – je tvořena komparátorem IC6B s výstupem typu otevřený kolektor. Povel ochrany k vypnutí je pomocí tranzistorů Q3 a Q5 přenesen až na hradlo výkonového tranzistoru Q6, který zkratový proud vypíná. Komparátor s výstupem typu otevřený kolektor je použit, aby bylo možné řadit více ochran paralelně (viz kap. 6.5).



Obr. 9.2: Časový průběh reakce zkratové ochrany na simulovaný zkrat

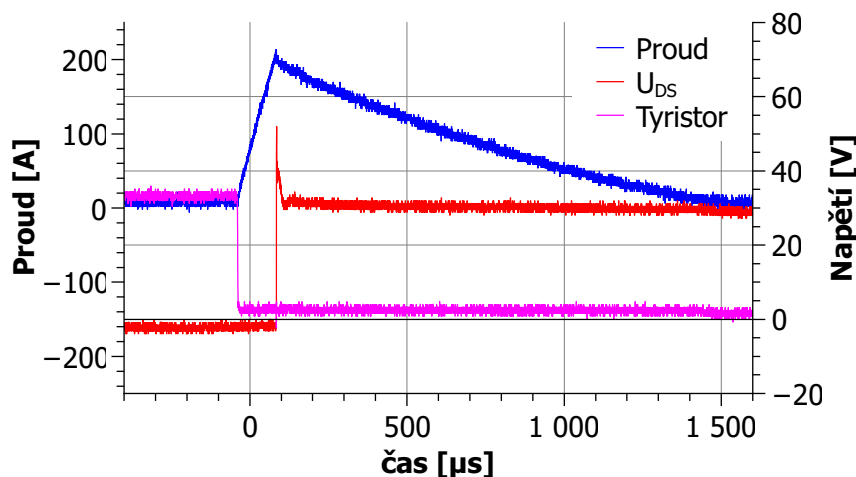
Během testování zkratové ochrany byl k napájení BMS použit místo baterie laboratorní zdroj a kondenzátor o velké kapacitě. Vzhledem k tomu, že vypnutí zkratu je děj velice rychlý, napětí na kondenzátoru vůbec nekleslo, a kondenzátor tak dobře simuloval napájení z baterie, která je schopna dodat velký zkratový proud. Zároveň se tímto uspořádáním minimalizovalo riziko v případě, že by zkratová ochrana selhala.

9.5.1 Zkrat spínaný tyristorem

V prvním případě byl výstup BMS zkratován přes malou indukčnost v sérii s tyristorem. Po aktivaci výstupu BMS byl sepnutím tyristoru simulován dokonalý a velmi

rychlý zkrat výstupu, proud byl omezen pouze indukčností a následným vybavením ochrany. Spínání tyristorem bylo použito, aby měřené výsledky nezkreslovalo jiskření, které vznikalo v případě, že byl zkrat vytvořen prostým spojením vodičů.

Záznam vypnutí zkratu je uveden na Obr. 9.3. Proud (modrý průběh) nejprve strmě narůstá až na hodnotu 200 A, kdy zareaguje zkratová ochrana a vybaví. Proud poté velmi pozvolna klesá, protože připojená indukčnost je demagnetizována pouze úbytkem napětí na nulové diodě a na sepnutém tyristoru. Červený průběh je napětí na tranzistoru. To se v okamžiku vybavení ochrany skokově změní z 0 V na 30 V, což bylo napětí, na které byl nabit kondenzátor před začátkem zkratu (kondenzátor nahrazuje napájení z baterie). Fialový průběh je napětí na tyristoru.



Obr. 9.3: Průběh vypnutí zkratu na výstupních svorkách BMS

9.5.2 Zkrat přímo na výstupu BMS

Dalším testem zkratové ochrany bylo vypnutí zkratu, který vznikl velice blízko výstupních svorek BMS prostým spojením dvou krátkých vodičů. Tento zkrat simuluje jednu ze situací, která může v praxi nastat – omylem dojde ke zkratu výstupních vodičů baterie (například se dotknou dvě neizolovaná kabelová oka). Zkratový proud je v tomto případě omezen pouze parazitními indukčnostmi a jeho nárůst je velmi strmý. Tento test měl ověřit, jestli je zkratová ochrana schopná zareagovat dříve, než zkratový proud naroste na hodnotu, kterou nebudou již schopny tranzistory vypnout. Dále byla při tomto testu zkoumána i reakce obvodů měření proudu (bočník a operační zesilovač v diferenčním zapojení).

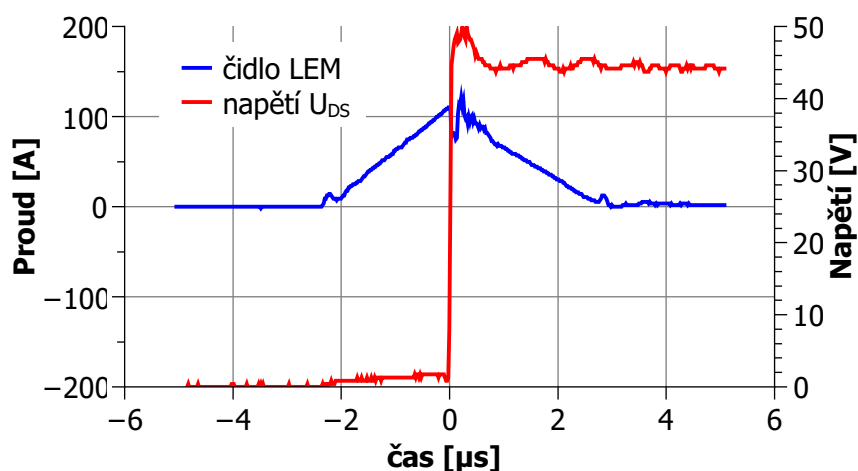
Zaznamenané průběhy při vypnutí zkratu na svorkách BMS jsou uvedeny na Obr. 9.4 a Obr. 9.5. Z průběhů je patrné, že došlo k úspěšnému vypnutí zkratu. Čas mezi začátkem zkratu a vypnutím tranzistoru Q6 (tedy nárůstem napětí na tomto

tranzistoru) je přibližně $2\text{ }\mu\text{s}$ (viz Obr. 9.4). Čas reakce zkratové ochrany je určitě menší, než $2\text{ }\mu\text{s}$, protože ochrana reaguje až při určité hodnotě proudu a ne ihned při začátku jeho nárůstu.

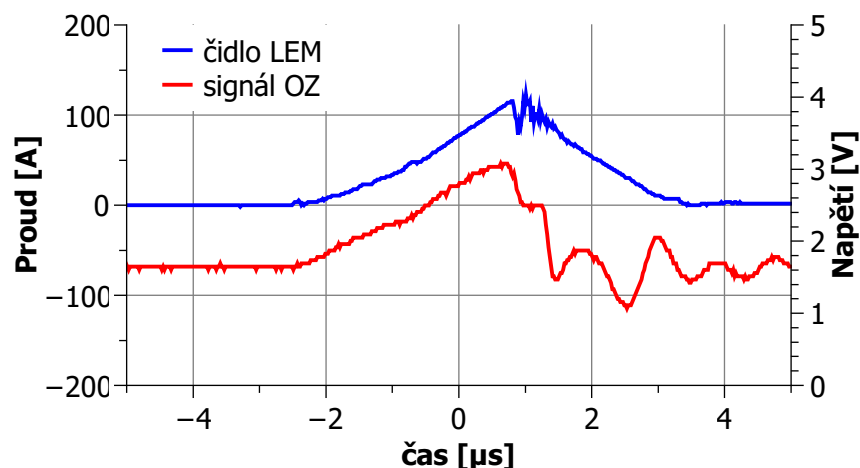
Měřená maximální hodnota proudu 100 A je zavádějící, proud musel být ve skutečnosti větší. Důvodem je malá šířka pásma proudového čidla LEM LF 310-S, výrobce udává 100 kHz [22]. Doba trvání měřeného děje je $2\text{ }\mu\text{s}$, čemuž by odpovídalo 500 kHz , proudové čidlo již výrazně zkresluje velikost měřeného proudu.

Na Obr. 9.5 je uvedeno porovnání signálu z proudového čidla LEM (modrý průběh) a signálu z bočníku po zesílení (červený průběh). Signál z bočníku dosahuje maximální hodnoty 3 V , což odpovídalo maximálnímu proudu přibližně 250 A .

Po vypnutí tranzistorů klesá zkratový proud mnohem rychleji, než by se dalo očekávat. Magnetizace indukčnosti probíhala připojením napětí cca 40 V , po vypnutí zkratu by se měl proud uzavírat přes nulovou diodu a parazitní indukčnost by měla být demagnetizována pouze úbytkem napětí na této diodě. Proud by měl klesat přibližně 40 krát pomaleji, než narůstal. To, že tomu tak ve skutečnosti není, je pravděpodobně způsobeno zajiskřením během dotyku vodičů. Úbytek napětí na vzniklém oblouku demagnetizuje indukčnost mnohem rychleji, než by ji demagnetizoval jenom úbytek na nulové diodě.



Obr. 9.4: Průběh vypnutí zkratu na výstupních svorkách BMS



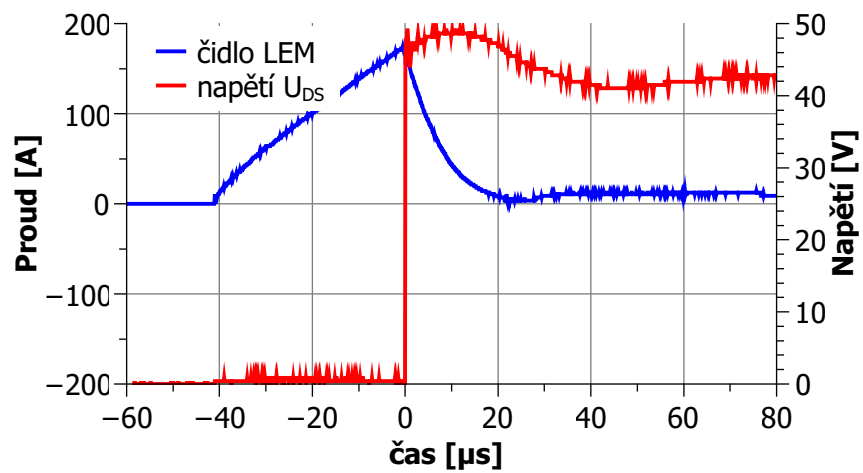
Obr. 9.5: Porovnání měření proudu čidlem LEM a BMS (zkrat přímo na výstupu)

9.5.3 Zkrat na konci dlouhých vodičů

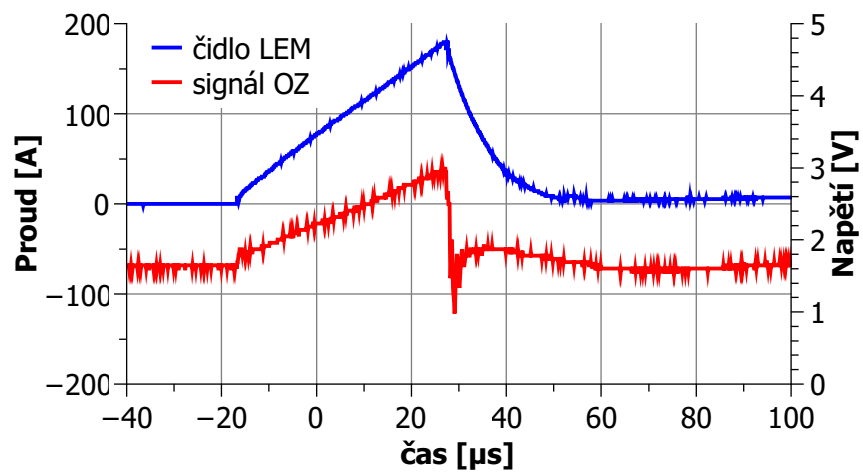
Tento poslední test je jakousi kombinací dvou předešlých testů. Zkrat byl opět vyvolán prostým spojením dvou vodičů, do cesty zkratovému proudu byla však vřazena malá indukčnost (16 závitů drátu na železné trubce o průměru 25 mm). Tento test simuluje další situaci, která může v praxi nastat. Ke zkratu dojde v zařízení, které je k baterii připojeno dlouhými vodiči (například prohoření větve tranzistorového střídače).

Průběhy zaznamenané při vypnutí zkratu s vřazenou indukčností jsou na Obr. 9.6 a Obr. 9.7. Průběhy ukazují, že došlo k úspěšnému vypnutí zkratu. Díky vřazené indukčnosti zde proud narůstá řádově pomaleji. Mezi začátkem zkratu a vypnutím zkratu uplynulo přibližně 50 μs, čemuž by odpovídala frekvence 20 kHz. Proudové čidlo LEM měří pravděpodobně správnou velikost proudu – zkratový proud dosáhl maximální hodnoty přibližně 200 A. Strmý pokles proudu po vypnutí tranzistoru je pravděpodobně způsoben zajiskřením při dotyku vodičů, jak bylo popsáno v jednom z předchozích odstavců.

Zesílený signál z bočníku dosahuje maximální hodnoty 3 V, což s aktuálním nastavením odpovídalo proudu přibližně 250 A. Rozdíl mezi tímto údajem a údajem přímo z proudového čidla LEM je velký. Způsoben je pravděpodobně nevhodným návrhem plošného spoje – signál z bočníku pro zesílení není snímán přímo na bočníku (vrchní vrstva plošného spoje), ale až na druhé straně plošného spoje. K odporu bočníku se tedy připočítává ještě odpor prokovů, které vedou z vrchní na spodní stranu plošného spoje.



Obr. 9.6: Průběh vypnutí zkratu na konci dlouhých vodičů



Obr. 9.7: Porovnání měření proudu čidlem LEM a BMS (zkrat na konci dlouhých vodičů)

10 ZÁVĚR

V první části diplomové práce byla provedena rešerše lithium-iontových článků. Tyto články jsou dnes pravděpodobně nejpokročilejší technologií v této oblasti, dosahují vysokých hodnot hustoty uložené energie na jednotku objemu i na jednotku hmotnosti. Vyžadují však šetrné zacházení a přesné dodržování parametrů, které výrobce uvádí. Drobné odchylky od stanovených hodnot mohou vést k výraznému zkrácení životnosti článků, větší odchylky mohou způsobit požár či explozi.

Baterii tvořenou lithiovými články je proto nutné během provozu pečlivě monitorovat a v případě překročení stanovených hodnot je nutno provést odpovídající akci. K tomu slouží systémy pro monitorování a ochranu baterií (zkráceně systémy BMS). Hlavními sledovanými veličinami jsou napětí článků, odebíraný proud a teplota v různých místech baterie. V případě překročení stanovených mezí systém BMS odpojí od baterie zátěž či nabíječku, aby předešel jejímu poškození.

V další části této práce byly na základě zjištěných skutečností definovány požadavky na systém BMS a byla navržena a popsána jeho koncepce. Systém byl od začátku vyvíjen ve spolupráci s firmou siliXcon, aby doplňoval její další produkty a správně s nimi spolupracoval. Systém se skládá ze třech hlavních částí:

- *Obvody měření napětí článků a balancování* – pro měření napětí článků a balancování jsou použity specializované obvody BQ76PL536A od firmy Texas Instruments zapojené podle doporučení výrobce. Na každých šest článků baterie v sérii připadá jeden obvod. Pro monitorování baterie o více než šesti článcích je nutné použít víc těchto obvodů a propojit je navzájem mezi sebou.
- *Mikroprocesor a obvody ochrany* – pro řízení celého systému je použit mikroprocesor, který vyhodnocuje měřená data a na jejich základě rozhoduje o případném odpojení zátěže či nabíječky. Baterie je tak chráněna před rizikovými stavy a zbytečným zkracováním její životnosti.
- *Polovodičový spínač* – připojení / odpojení zátěže či nabíječky od baterie je realizováno pomocí tranzistorů MOS-FET. Jejich použitím je dosaženo malých rozměrů a nízké hmotnosti celého zařízení.

Pro uvedené části byla navržena schémata zapojení a desky plošných spojů. Plošné spoje byly osazeny a oživeny. Souběžně s oživováním zařízení probíhal vývoj programu procesoru a testování jednotlivých částí zapojení. Byl navržen a implementován program pro komunikaci s balancovacími a měřicími obvody BQ76PL536A (tzv. driver BQ). Dále byl navržen algoritmus pro řízení celého systému BMS, který byl z části také již implementován.

Úspěšně byla otestována jedna z nejdůležitějších funkcí celého systému BMS – ochrana baterie vůči zkratu na výstupních svorkách. Tato ochrana je schopná odpojit výstup baterie v případě zkratu během jednotek až desítek mikrosekund.

Vývoj systému BMS bude pokračovat ve firmě siliXcon, hlavním úkolem bude dokončit implementaci řídicích algoritmů BMS. Kromě implementace řídicích algoritmů bude dále vyvíjen i hardware, kde bude například nutné opravit zapojení pro měření proudu a nebo upravit zapojení ochran tak, aby ve zkratové ochraně mohly být použity komparátory integrované přímo v procesoru (místo komparátorů diskrétních, které jsou použity v současnosti). Následovat bude důkladné testování celého zařízení a příprava podkladů pro sériovou výrobu.

LITERATURA

- [1] MEGAHED, S. a W. EBNER. Lithium-ion battery for electronic applications. *Journal of Power Sources* [online]. 1995, **54**(1), 155-162 [cit. 2016-12-04]. DOI: 10.1016/0378-7753(94)02059-C. ISSN 03787753. Dostupné z URL: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/037877539402059C>>.
- [2] SONG, Y., B. LU, X. JI a J. ZHANG. Diffusion Induced Stresses in Cylindrical Lithium-Ion Batteries: Analytical Solutions and Design Insights. *Journal of the Electrochemical Society* [online]. 2012, **159**(12), A2060-A2068 [cit. 2017-10-13]. DOI: 10.1149/2.079212jes. ISSN 0013-4651. Dostupné z URL: <<http://jes.ecsdl.org/cgi/doi/10.1149/2.079212jes>>.
- [3] TOPRAKCI, Ozan, Hatice A.K. TOPRAKCI, Liwen JI a Xiangwu ZHANG. Fabrication and Electrochemical Characteristics of LiFePO₄ Powders for Lithium-Ion Batteries. *KONA Powder and Particle Journal* [online]. 2010, **28**, 50-73 [cit. 2017-10-13]. DOI: 10.14356/kona.2010008. ISSN 0288-4534. Dostupné z URL: <<http://jlc.jst.go.jp/DN/JST.JSTAGE/kona/2010008?lang=en&from=CrossRef&type=abstract>>.
- [4] NEJEDLÝ, L. *Elektrody pro lithno-iontové baterie na bázi kobaltitanu lithného*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 61 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Marie Sedlaříková, CSc..
- [5] LANGER, L. *Modelování Lithium Iontových akumulátorů pomocí ECM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Vyroubal, Ph.D..
- [6] *BU-301a: Types of Battery Cells* [online]. [cit. 18.10.2017]. Dostupné z URL: <http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells>.
- [7] *BU-205: Types of Lithium-ion* [online]. [cit. 18.10.2017]. Dostupné z URL: <http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion>.
- [8] PANASONIC. *Lithium Ion NCR18650PF* [online]. June 2016 [cit. 24.10.2017]. Dostupné z URL: <<https://industrial.panasonic.com/cdbs/ww-data/pdf2/ACA4000/ACA4000C50.pdf>>.

- [9] SONY ENERGY DEVICES CORPORATION. *Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information, Model Number US18650VTC5* [online]. August 2013 [cit. 24.10.2017]. Dostupné z URL: <https://www.tme.eu/cz/Document/3c1a74ca2bc117b8a4c82130ce8ab214/sony_US18650VTC5.pdf>.
- [10] A123 SYSTEMS. *18650 Cylindrical Cell* [online]. [cit. 24.10.2017]. Dostupné z URL: <http://www.a123systems.com/Collateral/Documents/English-US/18650_2017_2%20page.pdf>.
- [11] *BU-409: Charging Lithium-ion* [online]. [cit. 25.10.2017]. Dostupné z URL: <http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries>.
- [12] *BU-304b: Making Lithium-ion Safe* [online]. [cit. 1.11.2017]. Dostupné z URL: <http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_304b_making_lithium_ion_safe>.
- [13] WEN, Sihua. Cell balancing buys extra run time and battery life. *Analog application journal* [online]. **2009**(1), str. 14 – 18 [cit. 1.11.2017]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/an/slyt322/slyt322.pdf>>.
- [14] ANDREA, David. *How much balancing current do you need?* [online]. [cit. 1.11.2017]. Dostupné z URL: <http://liionbms.com/php/wp_balance_current.php>.
- [15] FREEMENS. *FreeSafe Extended Battery Management System FS-XT – 6.0.1* [online]. [cit. 8.11.2017]. Dostupné z URL: <<http://freemens.fr/downloads/FSXT/FS-XT%20-%206.0.1.pdf>>.
- [16] EWERT ENERGY SYSTEMS. *Orion Jr. BMS* [online]. [cit. 8.11.2017]. Dostupné z URL: <https://www.orionbms.com/downloads/documents/orionbms_jr_specifications.pdf>.
- [17] ENERGUS POWER SOLUTIONS. *Tiny BMS 150/750A* [online]. [cit. 8.11.2017]. Dostupné z URL: <https://www.energusps.com/web/binary/saveas?filename_field=datas_fname&field=datas&model=ir.attachment&id=6896>.
- [18] TEXAS INSTRUMENTS. *BQ76PL536A 3-to-6 Series Cell Lithium-Ion Battery Monitor and Secondary Protection IC for Applications* [online]. **2011**, [cit. 23.12.2017]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/slusad3c/slusad3c.pdf>>.

- [19] TEXAS INSTRUMENTS. *TI Designs: BQ76PL536A-Q1 Reference Design* [online]. **2015**, [cit. 25. 12. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ug/tidub04/tidub04.pdf>>.
- [20] TEXAS INSTRUMENTS. *LM5009 Wide Input, 100 V, 150 mA, Step-Down Switching regulator* [online]. **2015**, [cit. 25. 12. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5009.pdf>>.
- [21] TEXAS INSTRUMENTS. *User's Guide: AN-2204 LM5017 Isolated Supply Evaluation Board* [online]. **2015**, [cit. 25. 12. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ug/snva611b/snva611b.pdf>>.
- [22] LEM. *Current transducer LF 310-S* [online]. **2015**, [cit. 8. 5. 2018]. Dostupné z URL: <https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lf_310-s.pdf>.